Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім Ю.М. Потебні
(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота магістра

рівень вищої освіти___другий магістерський рівень_____
(другий (магістерський) рівень)

на тему Дослідження методів зниження оксидів азоту шляхом оптимізації процесу горіння та способів спалювання палива

Виконав: студент ___2__курсу, групи *8.183*

__Міх Д.В._____
(ПІБ) (підпис)

спеціальності

____*183 Технологія захисту навколишнього середовища*
(шифр і назва)

спеціалізація

_____
(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

*Технологія захисту навколишнього середовища*_____
(шифр і назва)

Керівник Пруцьков Д.В._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент Кожемякін Г.Б._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя – 2024 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра _____*металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*_____

Рівень вищої освіти _____*другий магістерський рівень*_____
(другий (магістерський) рівень)

Спеціальність ___*183 Технологія захисту навколишнього середовища*_____
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма ___*Технологія захисту навколишнього середовища*___
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____***МТЕТБ***_____
_____***Ю.О. Бєлоконь***__

"__" _____2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ) СТУДЕНТУ

_____*Міх Дмитро Вікторович*_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи)__ Дослідження методів зниження оксидів азоту шляхом оптимізації процесу горіння та способів спалювання палива _____

керівник роботи (проєкту)_____*Пруцьков Дмитро Вікторович*_____*д.т.н, професор*_____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "_28_"_02___ 2024року № 359-с

2. Строк подання студентом роботи (проєкта)____*01.12.2024*_____

3. Вихідні дані до роботи (проєкта)__*Вдосконалення зниження оксидів азоту*_____
_____
_____

_4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Реферат. Вступ. Загальна частина. Розрахункова частина. Дослідницька частина, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки. Перелік джерел посилання.*
_____
_____
_____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Креслення, презентаційний матеріал 14 слайдах (на 14 сторінках)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Розділ 1 назва розділу	*Пруцьков Д.В., професор*	
Розділ 2 назва розділу	*Пруцьков Д.В., професор*	
Розділ 3 назва розділу	*Пруцьков Д.В., професор*	
Розділ 4 назва розділу	*Пруцьков Д.В., професор*	
Нормоконтроль	*Вагін А.В., доцент*	

7. Дата видачі завдання *07.05.2023*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	*Вступ*		
2	*Реферат*		
3	*Розділ 1*		
4	*Розділ 2*		
5	*Розділ 3*		
6	*Розділ 4*		
7	*Висновки*		

Студент _____ **Д. В. Міх**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ ***Д.В. Пруцьков***
(підпис) (прізвище та ініціали)

Реферат

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ВУГІЛЛЯ, ОКСИД АЗОТУ, ОКСИД СІРКИ, ПОЖЕЖО- ТА ВИБУХОНЕБЕЗПЕКА, ПИТОМА ВАГА, БЕЗПЕКА ПРАЦІ.

Міх Д.В. Кваліфікаційна робота «Дослідження методів зниження оксидів азоту шляхом оптимізації процесу горіння та способів спалювання палива».

Кваліфікаційна робота для здобуття ступеня магістра за спеціальністю 183 «Цивільна безпека», науковий керівник Д.В. Пруцьков. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, 2024, стр 96.

Обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, відображено практичну значущість, наукова новизна отриманих результатів, особистий внесок автора.

Проаналізовано сучасний стан досліджень антропогенного впливу вугільних ТЕС на довкілля. Виконано аналіз сучасних способів та технологій очищення димових газів, сформульовано основні переваги та недоліки кожної з технологій.

Наведено основні результати виконаних експериментальних досліджень. Встановлено теоретичні залежності концентрацій газових антропогенних викидів від температури в камері згоряння, способу приготування, концентрації та типу основних горючих та негорючих компонентів, концентрації та типу добавок різного походження. Розраховано відносні показники корисного використання ВВП та ОВВП на ТЕС.

ЗМІСТ

ВСТУП 9
РОЗДІЛ 1 КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ШКІДЛИВОГО ВПЛИВУ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ І ШЛЯХИ ЙОГО ЗНИЖЕННЯ 12
1.1 Аналіз шкідливого впливу продуктів згорання на навколишнє середовище 12
1.2 Сучасні технології зниження оксидів азоту у вихідних газах енергетичних установок 17
1.3 Сучасні способи очищення димових газів від оксидів азоту 30
1.4 Висновки 37
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА ТА ОКСИДІВ АЗОТУ У ПРОДУКТАХ ЗГОРЯННЯ 39
2.1 Аналіз існуючих уявлень про механізм горіння газового, рідкого і твердого палива 39
2.2 Закономірності утворення оксидів азоту при спалюванні органічних палив 45
2.2.1 Утворення оксидів азоту 45
2.2.2 Рівняння переносу для оксидів азоту 46
2.2.3 Термічне окислення азоту повітря 47
2.2.4 «Швидке» окислення азоту повітря 52
2.2.5 Утворення оксидів азоту 56
2.3 Утворення оксидів азоту в турбулентних факелах 60
2.4 Висновки 61
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СКЛАДУ ПРОДУКТІВ ЗГОРАННЯ 63
3.1 Порівняння газових антропогенних викидів 63
3.1.1 Порівняння антропогенних викидів при спалюванні вугілля та продуктів вуглезбагачення 65
3.1.2 Порівняння антропогенних викидів під час спалювання ВВП 66

3.1.3 Порівняння газових антропогенних викидів під час спалювання ОВВП 68
3.2 Вплив концентрації компонентів 70
3.2.1 Твердий горючий компонент 70
3.2.2 Вода 72
3.2.3 Рідкий горючий компонент 73
3.3 Потенційні покращення енергетичних характеристик котлів ТЕС при спалюванні ОВВП та ВВП замість вугілля 75
3.4 Висновки 80
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 82
4.1 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на працівника лабораторії 82
4.2 Заходи з поліпшення умов праці 83
4.3 Електробезпека 87
4.4 Протипожежна безпека 88
4.5 Засоби індивідуального захисту 89
4.6 Розрахунок захисного заземлення 91
4.7 Висновки 93
ВИСНОВКИ 95
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ 96

ВСТУП

Актуальність теми. Протягом останніх десятиліть споживання вугілля у світі зростає високими темпами. Тенденція глобальної електрифікації у більшості країн призводить до збільшення вироблення електроенергії. При цьому провідні позиції мають теплові електричні станції (ТЕС).

Широке використання вугілля для виробництва теплової та електричної енергії призвело до глобального забруднення навколишнього середовища та зміни клімату, а також до проблем екологічної деградації, погіршення здоров'я населення та підвищення смертності. Вплив вугілля на довкілля проявляється в усіх стадіях використання, тобто, від вилучення та транспортування до виробництва та передачі енергії. Видобуток вугілля супроводжується зміною ландшафту, утворенню шахт, кар'єрів, відвалів; транспорт вугілля – розсіюванням твердих частинок у ґрунт та атмосферу; спалювання – не тільки процес отримання енергії, а й основний постачальник у навколишнє середовище газових та твердих забруднюючих речовин. У разі спалювання вугілля на великих ТЕС виділяються у великих обсягах азото- та сірковмісні оксиди (NO_x та SO_x), леткі органічні сполуки (зола, сажа, пил), вуглекислий газ (CO_2), а також різні сліди металів, які можуть розсіюватися на великих площах та негативно впливати на здоров'я людини.

Метою роботи є дослідження способів зниження концентрацій основних газових антропогенних викидів (оксидів сірки та азоту) ТЕС при заміні традиційних вугільних палив на суспензійні, приготовані з відходів вуглезбагачення та нафтопереробки.

Для досягнення мети вирішувалися такі **завдання**:

1. Провести аналіз діапазонів зміни концентрацій основних газових антропогенних викидів ТЕС, що працюють на вугіллі, мазуті, газі, а також групі суспензійних палив (ВВП та ОВВП).

2. Визначити екологічні залежності характеристик спалювання перспективних паливних суспензій від температури в камері згоряння,

концентрації та властивостей горючих компонентів, концентрації та властивостей добавок.

3. Дослідити відносні показники ефективності використання традиційних та перспективних суспензійних палив на ТЕС.

Об’єкт дослідження. Традиційне паливо ТЕС. Антропогенні продукти, що утворюються при їх спалюванні.

Предмет дослідження. Дослідження процесів спалювання палив та вибір найбільш доцільної для реєстрації в лабораторних умовах концентрацій антропогенних викидів, що утворюються при горінні перспективних суспензійних палив.

Методи дослідження. Використання сучасних хімічних та інструментальних методів аналізу із застосуванням сертифікованих методик та обладнання, відповідністю теоретичних розрахунків результатам експериментальних робіт, а також практичною реалізацією розробленого методу.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розроблено методику для проведення досліджень щодо визначення компонентного складу газових антропогенних викидів та їх концентрацій, що формуються при спалюванні суспензійних палив.

2. Визначено оптимальні (з точки зору найбільш важливих для ТЕС основних екологічних та енергетичних характеристик) співвідношення компонентів суспензій ВВП та ОВВП (з урахуванням добавок).

3. Встановлено діапазони температур спалювання, що забезпечують отримання максимальної екологічної ефективності палив суспензійних порівняно з вугіллям.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновано екологічне зниженням концентрацій основних антропогенних викидів вугільних ТЕС та звільненням територій відвалів від індустріальних відходів за рахунок залучення останніх у складі перспективних палив.

Особистий внесок автора полягає в аналізі літературних даних, відпрацюванні методик вимірювань, вибору теоретичних та експериментальних методів вирішення поставлених завдань, розробці дослідницького обладнання, особистої участі у проведенні експериментальних досліджень, аналізі та інтерпретації отриманих даних.

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилання з 21 найменування, викладена на 100 сторінках машинописного тексту, включаючи 17 рисунків, 4 таблиці.

РОЗДІЛ 1
КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ШКІДЛИВОГО ВПЛИВУ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ І ШЛЯХИ ЙОГО ЗНИЖЕННЯ

1.1 Аналіз шкідливого впливу продуктів згорання на навколишнє середовище

Існує нерозривна взаємозалежність умов забезпечення енергопостачання та захисту від забруднення навколишнього середовища. На сучасному етапі проблема впливу енергетики на навколишнє середовище пов'язана з поширенням цього впливу на величезні території, незалежно від державних кордонів. Виникає дилема: енергетика, що є основою технічного прогресу, стає чинником, що представляє загрозу для існування самої людської цивілізації. Вихід з цієї ситуації може бути знайдений у всесторонньому розгляді проблеми взаємодії людини і навколишнього середовища, початок якому було покладено В. І. Вернадським [1,2].

Стурбованість людства рівнем забруднення навколишнього середовища привела до широкого обговорення цієї проблеми, а потім до прийняття відповідних угод. У 1972 р. відбулася Стокгольмська конференція з навколишнього середовища, на якій були закладені основи розуміння того, що необхідно припинити руйнування природного середовища. В 1983 р. була створена Всесвітня комісія з навколишнього середовища і розвитку ООН. У 1992 р. відбулася конференція ООН з навколишнього середовища та розвитку в Ріо-де-Жанейро. У 1997 р. в м. Кіото (Японія) були укладені Кіотські угоди про кількісні показники скорочення викидів парникових газів в 2008-2012 роках.

В Україні до 70% теплового забруднення навколишнього середовища і близько 50% усіх шкідливих викидів в даний час припадає на частку паливно-енергетичного комплексу [3].

На сучасному етапі розвитку людства в атмосферу в усьому світі надходить щорічно більше 850 млн. т. оксидів азоту, 150 млн. т. діоксиду сірки,

310 млн. т. оксиду вуглецю, 250 млн. т. вуглекислого газу, 3 млн.т. вуглеводнів [4].

Серед основних виробництв, що забруднюють навколишнє середовище, теплові електростанції, які займають провідне місце. Наявні відомості про ступінь і причини забруднення навколишнього середовища в даний час недостатні. Механізми і наслідки прямого впливу багатьох речовин на навколишнє середовище, взаємозв'язок їх концентрації зі збитком здоров'ю людей до кінця не з'ясовані. Орієнтовно виробництво електроенергії завдає шкоди навколишньому середовищі, який оцінюється в 4-6% від собівартості виробленої енергії [5]. Структура збитку в даний час оцінюється наступними чином: 40-45% – за рахунок погіршення здоров'я населення; 33-34% – втрати у житлово-комунальному господарстві; 10-12% у сільському та лісовому господарстві; 10-12 % шкода від промисловості.

Вміщені в димових газах оксиди азоту й сірки є токсичними речовинами, а в разі їх змішання з вологою повітря вони утворюють кислоти, які випадають на землю, у вигляді так званих кислотних дощів, завдають шкоди сільськогосподарським угіддям, руйнують інженерні споруди, наносять шкоду здоров'ю людей і всьому живому на Землі.

Розглянемо особливості впливу на природу основних забруднювачів. У зв'язку з вмістом в паливі сірки, у димових газах майже завжди присутній діоксид сірки. Доведено пряму взаємозалежність наявності діоксиду сірки в атмосфера з рівнем захворюваності людей [2].

Якщо середньорічна концентрація діоксиду сірки в атмосферному повітрі становить 0,08-0,1 мг/м^3, то виникає дискомфорт, з'являються симптоми погіршення дихання; якщо концентрація досягає рівня 0,25-0,5 мг/м^3, погіршується стан людей з легеневими захворюваннями, зростає смертність. При концентрації більше 400 мг/м^3, може настати смертельний результат при впливі дії на людину більше однієї години. Діоксид сірки може діяти як відновник, так і як окислювач, вступати в фотохімічну або каталітичну реакцію з іншими речовинами, що знаходяться в повітрі. Дослідження показали, що діоксид сірки

постійно окислюється в атмосфері під впливом сонячного світла і найдрібніших частинок пилу в триоксид сірки. Найбільш активно процес перетворення SO_2 в SO_3 йде за наявності випромінювання з довжиною хвилі 220-250 нм. Згідно з деякими дослідженнями, кінцеві продукти діоксиду сірки розподіляються наступним чином: на поверхню літосфери випадає 43%, на поверхню гідросфери – 32%; поглинається рослинами – 12%, а поверхнею гідросфери – 13% [6]. Надзвичайно чутливі до впливу гідроксиду сірки рослини. Це значною мірою зумовлює нанесенню сільському і лісовому господарству збитків. Показано, що при концентрації сірчистого газу в повітрі про 0,23-0,32 мг/м^3 відбувається порушення фотосинтезу і дихання хвої, що призводить до загибелі сосни за два три роки. Листяні рослини менш схильні до дії діоксиду сірки [7].

В атмосфері при незначній вологості, діоксид сірки може існувати два-три тижні. Технологічні методи зниження викиду діоксиду сірки за рахунок зміни умов спалювання палива практично не роблять впливу на його кількість в димових газах, щоб зменшити викид в атмосферу діоксиду сірки можна використовувати наступні заходи:

- очищати паливо від сірки перед подачею в топку;
- пов'язувати сірчистий ангідрид спеціальними добавками;
- очищати димові гази від оксидів сірки;

Найбільш поширеними викидами ТЕС є оксиди азоту. Вони утворюються при спалюванні будь-якого виду палива, так як при підвищених температурах атмосферний азот окислюється киснем.

Оксиди азоту (NO_x) – одна з найбільш значущих складових у переліку шкідливих викидів, що містяться в димових газах енергетичних котлів, вихлопних газах двигунів різних типів і виникають у результаті деяких технологічних процесів у промисловості. Існують також природні джерела оксидів азоту – бактеріальна активність в ґрунті, грози, виверження вулканів.

Найважливішими з NO_x є NO і NO_2, оскільки решта ($N_2O, N_2O_3, N_2O_4, N_2O_5$ і пари HNO_3), які можуть бути присутніми у повітрі, не є біологічно значимими.

Фонові концентрації оксидів азоту в атмосфері змінюються в межах 0,4-9,4 мкг/м^3. Типовий вміст діоксиду азоту в повітрі міст – 20-90 мкг/м^3 (середньорічні концентрації); граничні концентрації можуть досягати 240-850 мкг/м^3. Поблизу заводів, що виробляють азотну кислоту або вибухові речовини, або поблизу теплоелектростанцій, відзначаються дуже високі концентрації.

Оксиди азоту – ключові елементи окислювальних процесів в атмосфері. Від рівня їх концентрації в атмосфері залежить вміст вільних радикалів та інтенсивність видалення із забрудненого повітря органічних сполук.

Оксиди азоту займають друге місце після діоксиду сірки за вмістом із збільшення кислотності опадів. На додаток до непрямого впливу (кислотний дощ), тривалий вплив діоксиду азоту в концентрації 470-1880 мкг/м^3 може пригнічувати ріст деяких рослин (наприклад, томатів). Значимість атмосферних ефектів оксидів азоту пов'язана з погіршенням видимості. Діоксид азоту відіграє важливу роль в утворенні фотохімічного смогу.

Оксиди азоту можуть негативно впливати на здоров'я самі по собі і в комбінації з іншими забруднюючими речовинами. Пікові концентрації діють сильніше, ніж інтегрована доза. Короткочасний вплив 3000-9400 мкг/м^3 діоксиду азоту викликає зміни в легенях. Крім підвищеної чутливості до респіраторних інфекцій, вплив діоксиду азоту може призвести до підвищеної чутливості до бронхостенозу (звуження просвіту бронхів) у чутливих людей. Дослідження показали, що для хворих на туберкульоз, астмой і аналогічних хворих, підвищується ризик негативних легеневих ефектів при утриманні діоксиду азоту значно меншому, ніж той, на який не спостерігається реакція у здорових людей.

Говорячи про енергетику, утворення оксидів азоту відбувається в так званій зоні активного горіння топок котлів (для паротурбінного циклу) або в камерах згоряння ГТУ. Вихід оксидів азоту повністю визначають наступні параметри: коефіцієнт надлишку повітря, максимальна температура факела, тривалість перебування продуктів горіння в області високих температур. Ці

характеристики досить повно відображають сутність фізичних процесів, що протікають в топці котла, і порівняно легко визначаються розрахунками [16].

Антропогенні джерела забруднення атмосфери оксидами азоту обумовлені діяльністю людей. Серед цих джерел велику роль відіграють теплові електростанції, котельні, печі, двигуни внутрішнього згоряння, металургія, виробництво скла, авіація, пуски ракет тощо. У результаті людської діяльності в навколишнє середовище в рік надходить близько 53 млн. т. оксидів азоту [8]. У димових газах переважно (95-99%) оксиди азоту містяться у вигляді NO. В атмосфері, в результаті фотохімічного впливу протягом декількох годин NO перетворюється на NO_2, який згодом може утворювати кислоту HNO_3. Оксиди азоту володіють високою токсичністю, але вони можуть також утворювати ще більш токсичні комплекси, наприклад нітробензол C_6H_5NO. Геліоксид азоту N_2O сприяє руйнуванню озонового шару атмосфери. При концентрації оксидів азоту 15 мг/м^3 відзначається роздратування очей, а при концентрації 200-300 мг/м^3, може утворюватися набряк легень [4].

Одним з найбільш небезпечних забруднювачів середовища при спалюванні палив є канцерогенні речовини. Існує близько ста канцерогенних з'єднань [10].

При спалюванні палив у топках парових котлів утворюється значна кількість поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ), ароматичних амінів та аміно-азосполук, які є однією з найбільш шкідливою групою речовин, що негативно впливають на життєдіяльність людей [7, 11]. Найбільш характерною і найбільш вивченим з групи ПАУ стосовно до енергетики є бензопірен $C_{20}H_{12}$. Відомо, що частку бензопірену складають близько 1,2% від усієї концентрації ПАВ, але вже близько 10,2% від суми канцерогенних ПАВ. Найбільш ймовірним є виникнення на самій початковій ділянці факела, поки не розвинулися високі температури, при яких концентрації реагентів, що беруть участь в утворенні бензопірену, стають дуже малими. Звідси випливає, що для зменшення кількості бензопирену необхідно вести процес спалювання палива без появи в локальних

зонах нестачі окислювача і без зниженого рівня температур. Однак, ці вимоги прямо протилежні основним передумовам для зниження утворення оксидів азоту коли необхідне зменшення надлишку окислювача і рівня температур. Організація процесу горіння в топці котла при оптимальних кількостях окислювача і температурі з точки зору мінімізації утворення оксидів азоту і бензопирену в даний час не вирішена в основному через складність моніторингу вмісту бензопирену в димових газах.

Бензопирен залишається в атмосфері близько тижня при погоді з опадами і до двох тижнів на суху погоду [7], а в ґрунті він зберігається до 4-х місяців, що означає високий ступінь небезпеки для здоров'я людей.

Аналіз показав, що абсолютний рівень концентрації $C_{20}H_{12}$ в продуктах згорання палива залежить від ряду факторів: виду палива і його підготовки до спалювання, параметрів паливоповітряної суміші, технології процесів утворення оксидів азоту [4].

Таким чином, для досягнення мети зниження шкідливого впливу продуктів згорання палива на навколишнє середовище необхідно забезпечити оптимальне поєднання технологічних методів спалювання палива, що забезпечують мінімальну кількість всіх шкідливих речовин, які утворюються при спалюванні палив. Одночасно необхідно забезпечити роботу обладнання з високими техніко-економічними показниками.

1.2 Сучасні технології зниження оксидів азоту у вихідних газах енергетичних установок

В даний час є уявлення про чотири різні способи утворення NO_x в горінні, кожен з яких по-своєму важливий у залежності від топлива, схеми пристрою та інших умов, в яких відбувається згорання. Це термічний шлях (або механізм Зельдовича), «швидке» утворення NO_x (механізм Фенімора), утворення окислів через N_2O та окислів з топливного азоту [17-20].

Розглянемо застосовувані в сучасній енергетиці методи зниження викидів оксидів азоту. Ряд оригінальних розробок пропонуються як вітчизняними, так і зарубіжними науковими організаціями та промисловими компаніями.

Зниження вмісту оксидів азоту в димових газах може досягатися декількома методами. Промислові методи зниження викидів оксидів азоту діляться на первинні, спрямовані на придушення утворення NO_x в процесі горіння (їх також називають «технологічними», так як в цьому випадку має місто зміна технології спалювання палива), і вторинні – передбачають системи газоочистки [13].

Технологічні методи найбільш поширені в нашій країні, так як не вимагають, в основному, значних початкових капіталовкладень. Їх, у свою чергу, можна класифікувати, підрозділивши на три основні групи.

У першу чергу це технологічні заходи, спрямовані на зниженні максимальної температури в топці. До них слід віднести рециркуляцію димових газів, упорскування вологи, зниження температури гарячого повітря, рівномірний розподіл факела по висоті топки. До другої групи слід віднести методи, спрямовані на зниженні концентрації окислювача, такі як не стехіометричне спалювання, ступінчате спалювання, використання пальників з затягнутим сумішоутворенням, пальників з регульованою часткою первинного повітря, спалювання в предтопке з недостатньою кількістю окислювача. І, нарешті, для зниження шкідливих викидів енергетичних котлів використовуються спеціальні методи спалювання, це спалювання в киплячому шарі, попередня термічна обробка палива або методи, що припускають відновлення NO_x в топці.

Як вже було сказано, в умовах економічної кризи особливого значення набувають маловитратні технологічні заходи зниження шкідливих викидів. Прикладом є досвід організації раціонального сумісного спалювання газу і мазуту в котлах ПК-41. Дослідження показали, що при підсвічуванні газового факела мазутом, спалюється в окремих пальниках або спільно з газом в одному пальнику, вдається досягти зниження оксидів азоту на 20-30%. Причинами цього

ефекту є: зниження температури в зоні активного горіння за рахунок підвищення світності і випромінювальної здатності факела, а також різна реакційна здатність газу і мазуту. Газ згорає на початковій ділянці факела з більш високою швидкістю, ніж мазут. Це викликає «розтягання» зони активного горіння і приводить к додатковому зниженню максимальної температури в ядрі факела. Впровадження даного організаційного заходу дозволило знизити концентрації NO_x не менше ніж на 20%.

Інший приклад – низькотемпературна вихрова (НТВ) технологія спалювання твердого органічного палива [15]. До головних переваг НТВ технології спалювання відносяться її покращені екологічні показники, гарантоване забезпечення сталого займання і горіння твердих палив без підсвічування газом і мазутом, усунення шлакування.

НТВ технологія спалювання може бути реалізована в традиційній камерній топці, шляхом її модернізації в період капітального ремонту котла.

Для підготовки палива грубого помелу використовуються існуючі млини з спрощеними сепараторами або без них, а для таких палив як торф, відходи деревини, лігнін можливе використання безмлинових схем.

У більшості випадків НТВ технологія спалювання не вимагає для її реалізації змін до теплової схеми котла і заміни тягодуттьових пристроїв.

Модернізація котлів з переводом їх на НТВ-спалювання дозволяє з малими витратами оновити існуюче котельне обладнання, поліпшити його техніко-економічні та екологічні показники, спростити експлуатацію і підвищити надійність роботи котлів.

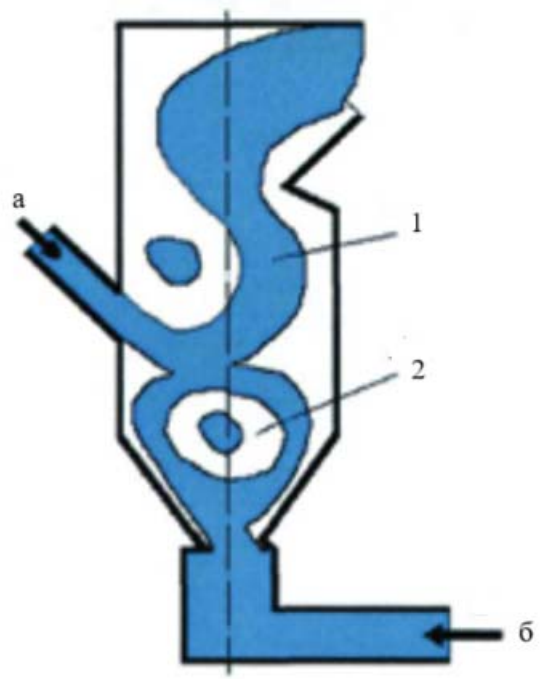
Важливою перевагою НТВ технології спалювання є низька чутливість до коливань характеристик пального. Це уніфікує топку по паливу і дає можливість спалювати в одному котлі кілька видів твердого палива.

НТВ технологія спалювання пройшла апробацію на широкій вибір твердого топлива, таких як торф, буре і кам'яне вугілля, горючі сланці, відходи деревовиробництва і мікробіологічного виробництва.

НТВ технологія спалювання відпрацьована на котлах продуктивністю від 35 до 420 тонн пари на годину при спалюванні практично усього вибору органічних палив і горючих твердих відходів виробництва в Україні, Естонії, Болгарії.

В основу НТВ технології закладено принцип організації низькотемпературного спалювання твердого палива грубого помелу в умовах багаторазової циркуляції частинок в камерній топці.

У НТВ-топці (рис. 1.1) організовані дві зони горіння, які рознесені по її висоті: вихрова (2) і прямоточна (1). Вихрова зона займає обсяг нижньої частини топки від гирла топкової воронки до пальників. Прямоточна зона горіння розташовується над вихровою зоною у верхній частині топки.



а – паливно-повітряна суміш, б – повітря нижнього дуття, 1 – прямоточний факел, 2 – вихрова частина факела

Рисунок 1.1 – Схема НТВ-топки.

Аеродинаміка вихрової зони створюється за рахунок взаємодії двох потоків: перший потік (а) сформований з паливно-повітряної суміші, що надходить у топку через пальники; другий потік (б) складається з гарячого

повітря, що подається в топку через систему нижнього дуття. Потоки спрямовані назустріч один одному й утворюють пару сил, що створює вихровий рух в нижній частині топки.

На відміну від традиційної технології пиловугільного спалювання, де основна частина палива (до 92-96%) згоряє в так званій «зоні активного горіння», розташованої в районі пальників і що займає відносно невеликий обсяг камерної топки, в вихровий топці з НТВ технологією спалювання в «зону активного горіння» залучений значно більший обсяг топкового простору. Це дає можливість знизити максимальну температуру в вихровій топці (приблизно на 100-300 °С) і за рахунок активної аеродинаміки вирівняти рівень температури в об'ємі вихрової зони.

Знижений рівень температури, ступінчате введення окислювача, многократна циркуляція палаючих паливних частинок і грубий гранулометричного склад золи, в сукупності забезпечують поліпшені показники вихрових топок по шкідливим викидам оксидам азоту і сірки, а також підвищують ефективність роботи золоуловлювального обладнання котельної установки.

Зниження генерації оксидів азоту в НТВ-топці обумовлено умовами топочного процесу: низьким рівнем температури в зоні активного горіння та ступенчатим підведенням окислювача до палива. Максимальна температура продуктів згоряння в класичній НТВ-топці не перевищує 1100-1250 °С.

Вихрова зона топки є практично ізотермічною. При такому температурному рівні утворюються в основному «паливні» оксиди азоту і кількість «повітряних» оксидів азоту мізерно мала. Коефіцієнт надлишку повітря в пальниках при НТВ-спалюванні залежить від марки палива. У результаті застосування НТВ-спалювання вдається знизити генерацію оксидів азоту в 1,2-2,0 рази в порівнянні з традиційною технологією спалювання в прямоточному факелі [16].

Закордонні компанії також активно впроваджують технології, що дозволяють знижувати оксиди азоту технологічними методами. Один із

прикладів – підрозділ по виробництву енергетичних котлів італійської компанії, яка пропонує відразу кілька рішень для зниження шкідливих викидів. Це спеціально розроблені пальники з низьким рівнем утворення оксидів азоту і газомазутні пальники; пристрої та технологію багатоступінчастого спалювання з поділом подачі повітря на два ступені а також технологія рециркуляції газів.

Пальник TEA-BA призначена для спалювання газу і рідких палив(мазут, нафта). У більшості випадків, її розміри і технологічна конструкція дозволяють монтувати пальник в існуючі котли без будь-яких серйозних змін. Конструкція пальника (рис.1.2) дозволяє подавати паливо з дуже низькими значеннями коефіцієнта надлишку повітря та «розтягнути» факел і значно знизити максимальну температуру в ньому, пальник може використовуватися в системах багатоступінчастого спалювання. Скорочення викидів NO_x в цьому випадку становить у середньому 50% в порівнянні зі звичайними пальниками.



Рисунок 1.2 – Пальник TEA-BA призначений для спалювання газу і рідких палив (мазут, нафта)

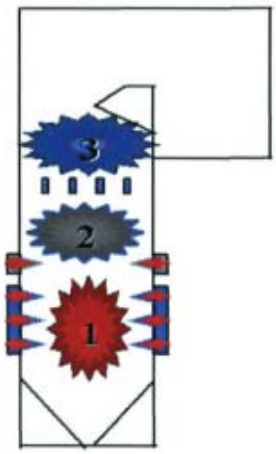
TEA-C застосовується для спалювання твердих і рідких палив. Цей пальник показав можливе зниження викидів NO_x при використанні вугілля 550mg/Nm^3 + 650mg/Nm^3 і 6% O_2. Пристрій призначений для використання в схемах з багатоступеневим згорянням/допалюванням.

Багатоступінчасте спалювання з поділом подачі повітря засноване на подачі від 20% до 30% повітря в кілька стадій від головних пальників до інжекторів у верхній частині топки, для створення не стехіометричних умов у зоні проведення первинного горіння, і отже, зниження утворення NO_x.

Швидке і однорідне змішування потоку повітря і палива (OFA), яке є ключовим моментом для успішного застосування цієї технології, оптимізовано використанням спеціальних розробок і дозволяє досягнути скорочення викидів NO_x до 65% - 75%.

Технологія «допалювання» - триступінчатого ступеневого спалювання палива призначена для ефективного придушення топкових оксидів азоту, шляхом відновлення. Вона вимагає подачі частини палива в зону розташовану над основним факелом (зона «допалу»), де утворюються умови для відновлення NO_x вуглеводневими радикалами до елементарного азоту.

Для забезпечення найбільш повного змішання «допалює палива» з вступниками продуктами згорання основного смолоскипа, здійснюється рециркуляція газів від після економайзера до пальників «допалення палива». Для повного згоряння вуглеводнів, що не прореагували, у верхню частину топки подається повітря за принципом OFA (рис. 1.3).



1 – зона горіння, 2 – зона відновлення оксидів азоту, 3 – зона дожиття

Рисунок 1.3 – Технологія «допалювання»

Ефективним способом для зниження викидів оксидів азоту енергетичними котлами є спалювання водомазутної емульсії і природного газу з додаванням вологи, що призводить до зниження рівня температур в зоні максимальної генерації оксидів азоту, і отже, до значного (на 30-50%) зниження їх концентрації в димових газах.

Метод спалювання водомазутної емульсії широко відомий. У дослідженнях, присвячених цьому питанню, встановлено, що для досягнення поставленої задачі ВМЕ повинна бути приготовлена у вигляді однорідної суміші мазуту і волога додається по типу «вода-масло», в якій вода як дисперсна фаза у вигляді частинок діаметром кілька мікрометрів знаходиться всередині паливної оболонки. Тільки при дотриманні цієї умови і вологості водомазутних емульсій до 20% забезпечується надійне запалення і стійке її горіння з високою повнотою згоряння. Підвищена ефективність процесу горіння емульсії (навіть при гранично низьких надлишках повітря) обумовлена мікровибухами її крапель, внаслідок різниці температур кипіння води і мазуту. При додатковому дробленні крапель емульсії досягається прискорення їх випаровування і поліпшується процес перемішування палива з повітрям, в результаті чого з урахуванням наявності в зоні горіння продуктів дисоціації води, процес згорання мазуту істотно інтенсифікується. Для приготування кондиційних ВМЕ необхідної вологості, дисперсності, в'язкості повинні застосовуватися відповідні емульгатори.

Можливе також уприскування вологи у вигляді пари в основу факела для зниження температури і поліпшення процесу горіння. Такий метод використовується, наприклад, американською компанією-виробником енергетичного обладнання «Coen». Однак, за даними цієї компанії, він кілька витратніший у порівнянні з методами при яких використовується рециркуляція або багатоступінчасте спалювання. Нижче наведені дані цієї компанії з порівняльної вартості методів в залежності від паропродуктивності котла.

Значно виправдовує себе застосування упорскування вологи, якщо враховувати вплив цього методу на утворення канцерогенів (бензопірену) та

інших шкідливих речовин або коли цей метод дозволяє вирішити деякі інші проблеми виробництва, як наприклад, в роботах фахівців з використанням в якості додаткової вологи стічних вод.

Одним із способів підвищення надійності, економічності і екологічності роботи котлів, що працюють на рідкому паливі є поліпшення якості розпилювання останнього, турбулізація кореня факела, поліпшення змішання палива з окислювачем, формування форми факела примусово до даної топкової камери, а також створення умов при яких спалювання рідкого палива по теплотехнічним і експлуатаційним характеристикам не поступалося б спалюванню газоподібного палива. Найбільш переважним способом реалізації цих завдань є створення та впровадження акустичних форсунок.

Експериментальні дослідження проведені фахівцями підприємства по застосуванню акустичних форсунок на котлах показали що, впровадження акустичних форсунок дозволило підвищити ККД котлів на 0,7-2,3%, за рахунок поліпшення розпилювання, зниженням коефіцієнта надлишку повітря, поліпшенням турбулентності факела, більш повного вигоряння рідкого палива при меншому коефіцієнті надлишку повітря.

Необхідно відзначити, що схожі за принципом методи (акустичні форсунки) використовуються багатьма іноземними компаніями, наприклад, власні розробки в цій галузі має індійська державна компанія NRDC (National Research Development Corporation).

Широке впровадження нового виду рідкого палива «вугілля-водовугільне паливо» (ВВП) може служити основою ефективної заміни дорогих дефіцитних екологічно чистих природних енергоносіїв (природного газу та нафти) на багатьох ТЕЦ ГЕС з мінімальними капітальними витратами і з збереженням на необхідному рівні шкідливих викидів в атмосферу.

Водовугільне паливо – стабільне, екологічно чисте на всіх стадіях виробництва та використання, пожежо- і вибухобезпечне паливо з вугільних шламів з концентрацією твердих речовин не менше 60%, води - 39% і організованого пластифікатора - 1%.

Досвід експлуатації дослідно-промислового вуглепровода, широкомасштабні промислові випробування із заміни мазуту водовугільним паливом в запальних горнах агломашин показали суттєві технологічні переваги, високу ефективність процесу горіння ВВП і надійну роботу основного технологічного обладнання. В таблиці 1.1 представлені результати вимірів шкідливих викидів в атмосферу при спалюванні ВВП в порівнянні з традиційними видами палива

Таблиця 1.1 - Шкідливі викиди в атмосферу при спалюванні ВВП

Шкідливі викиди	Об'єкти							
	теплова електростанція		збагачувальна фабрика		котельня №1		котельня №1	
	вугільний пил + мазут	ВВП + вугільний пил	мазут	ВВП + мазут	мазут	ВВП	шарове спалювання вугілля	ВВП
Оксиди азоту (NO_x), мг/м^3	904	660	56,1	40,0	53,6	43,6	435	285
Оксиди сірки ($S0_2$), мг/м^3	1710	338	2011	1292	236,0	47,2	немає даних	немає даних
Пил, мг/м^3	639	222	755	914	немає даних	немає даних	82	45

Істотне зниження викидів оксидів азоту при спалюванні ВВП зумовлено більш низькою температурою в зоні горіння, що не перевищує 1000-1250 °С. Застосування низькосірчистого вугілля (вміст сірки не більше 0,5%) для приготування ВВП забезпечує зменшення утворення сірчистого ангідриду в димових газах. Крім того, використання водовугільного палива дозволяє з більшою ефективністю вловлювати оксиди сірки.

Особливості горіння тонкорозпилених крапель водовугільного палива призводять до утворення високопористих золових частинок, щільність яких не перевищує 350 кг/м^3. Ефективність роботи існуючих систем пилеловлення при спалюванні ВВП підвищується в порівнянні з пиловугільним спалюванням.

Тверда фракція продуктів згоряння – тонкодисперсна зола користується попитом у виробництві будівельних матеріалів, як з'єднувач при виготовленні бетонів для невідповідальних конструкцій, оздоблювальних та інших будматеріалів. Так як при спалюванні ВВП відбувається більш повне згоряння, до 95-98%, вихідного палива, обсяги твердих продуктів згоряння багаторазово нижче, ніж при спалюванні традиційного вугілля. При цьому ККД котлів зростає до 80% і мало залежить від їх фізичного стану, забезпечуючи тим самим високу економічність роботи котлів.

Нарешті, вельми перспективним методом зниження викидів оксидів азоту для котлів на твердому паливі є технологія спалювання палива в низькотемпературному киплячому шарі.

Особливістю процесу спалювання палива в киплячому шарі є наявність двофазного середовища, що володіє властивостями псевдорідини. Горіння палива здійснюється в шарі дрібнодисперсного матеріалу, що знаходиться в стані псевдорідини за рахунок подачі через цей шар повітря знизу вгору. Спалювання палива здійснюється при порівняно низьких температурах середовища рівних 850-900 °С і масової частки палива в киплячому шарі 1-3%.

Впровадження даної технології у вітчизняну енергетику дозволить спалювати більшу гаму низькосортних палив і суттєво, без спорудження спеціальних дорогих газоочисних установок, знизити викиди оксидів сірки і азоту в атмосферу.

В даний час за кордоном експлуатуються більш ніж 700 котлів із стаціонарного киплячим шаром. Найбільш потужні котли працюють на електростанції «Shawnee» (США) - паропродуктивністю 500 т/год і 1000 т/год на ТЕЦ «Takehara» (Японія), «Zhuhai» (700 МВт-КНР). Незважаючи на те, що державна технологія спалювання палива в киплячому шарі стала розвиватися водночас з роботами, виробленими в США та Німеччині, в Україні поки не освоєно жодного потужного енергетичного котла з цією технологією. Тому особливе місце в розробці та освоєнні екологічно чистої технології спалювання палива займає перший вітчизняний котел БКЗ 420-140 КС з киплячим шаром

(Д = 420 т/год; Р = 13,8 МПа; t = 540 °С). Котел змонтований і запущений в дослідно-промислову експлуатацію на ТЕЦ для відпрацювання в промисловому масштабі технології спалювання різного вугілля у киплячому шарі. За технологією підготовки, подачі палива і його спалювання відповідає кращим зарубіжним технологіям. Ряд технічних рішень, виконаних на котлі, не мають аналогів у світі.

Котлоагрегат БКЗ 420-140 КС однобарабанний, з комбінованою циркуляцією, газощільний з суцільнозварними екранами. Має чотири самостійні топкові секції, розташовані в два яруси, чотири пакети економайзера і спрощений підігрівач повітря. По ширині котла секції відокремлені один від одного екраном середньої стіни. У кожній топковій секції розташовуються випарні і пароперегрівальні поверхні нагрівання в шарі, пневматичні закидувачі палива, підводи повітря під грати і над нею, розпалювальні мікрокамери горіння, сепаратори зливу наповнювача шару.

Крім того, кожна секція обладнана пристроями пневмоподачі дрібних фракцій палива в шар. Також котел обладнаний системою уловлювання та повернута на допалювання винесення під киплячий шар розпалювальної секції. Пристрій котла відрізняється тим, що кожна із секцій котла може працювати незалежно один від одного. Потужність кожної секції складає 25% загального навантаження котла.

На відміну від серійних пиловугільних котлів, котел з киплячим шаром має наступні переваги: зменшення висоти котла на 12 м і зменшення металоємності на 25%, ефективність зв'язування діоксидів сірки становить 80-90%, скорочення на 20-30% викидів оксидів азоту, можливість економічного спалювання широкої гами вугілля. За даними Світового Банку вартість застосування технології спалювання вугілля у киплячому шарі на 5-15% менше, ніж при будівництві аналогічних за потужністю котлів із застосуванням розпилючих пальників і сухого або мокрого сіркоочищення.

Існують й інші перспективні напрямки первинного регулювання утворення оксидів азоту, зокрема, управління горінням за допомогою нерівноважною низькотемпературною плазмою з дуже маленьким вкладенням енергії.

Проблема впливу розрядів на горіння широко досліджується досить давно. Актуальними завданнями в цій галузі є розширення меж горіння і займання, зниження температури горіння при збереженні потужності для зменшення виробництва шкідливих викидів, зокрема, оксидів азоту. При цьому важливим критерієм ефективності керування полум'ям є ставлення вкладеної енергії до відносного збільшення швидкості при збереженні існуючої повноти згоряння.

Нагадаємо, що для скорочення кількості емісії оксидів азоту по термічному механізму – головному при газофазному горінні – необхідно знизити температуру полум'я. Один із способів це зробити – спалювати бідні суміші. Зі зменшенням температури різко падає константа швидкості реакції утворення оксиду азоту. Проведені розрахунки показують, що для зменшення константи в 10 разів необхідно зменшити коефіцієнт надлишку пального до 0,7; в 100 разів-до 0,55. Однак при зменшенні коефіцієнт надлишку пального падає і нормальна швидкість поширення полум'я а, значить, і потужність пальника. Тому необхідно прискорити полум'я і підняти швидкість горіння до «еквівалентного» за потужністю рівня. В лабораторних умовах вже було показано, що одним з найбільш ефективних способів управління горінням є вплив імпульсним наносекундним розрядом. Використання такого розряду дозволяє організовувати високі наведені поля і енергії електронів, достатні для електронного збудження та іонізації, в проміжками, практично не нагріваючи сам газ. Таким чином, даний механізм має високу ефективність. Використання наносекундних імпульсів в геометрії бар'єрного розряду дозволяє уникнути переходу розряду в іскрову форму і використовувати пропонований спосіб при великому тиску. Об'ємне (або близьке до об'ємного) порушення суміші дозволяє досягти більшої ефективності в порівнянні з локальним підпалом в топці.

У роботі використовувалися кварцові сопла прямокутного перерізу різної ширини: від 2 до 4,5 мм, і довжиною 30 мм. Високовольтний електрод,

виконаний у формі пластини, був встановлений всередині сопла паралельно його стінок. Заземлені електроди були поміщені усередину кварцових трубок і розташовувалися біля стінок сопла.

Ефективне енерговкладання відбувається тільки протягом перших 10-20 нс, після чого зона енерговиділення переміщається за межі сопла, де розряд вже не впливає на суміш, зосереджуючись біля електродів. Дослідження були виконані для імпульсів позитивної полярності трьох тривалостей: 7 нс, 19 нс і 24 нс, при напрузі на проміжку від 10 до 25 кВ, при частоті імпульсів 1 кГц. Вивчення полум'я проводилося методами емісійної спектроскопії та LIF - діагностикою. Для моделювання горіння і розповсюдження одновимірного попередньо перемішаного полум'я використовувалася програми premix пакету «Chemkin-II». Крім кінетики хімічних реакцій, в розрахунок були включені дифузія компонентів суміші, термодифузії і перенесення тепла.

1.3 Сучасні способи очищення димових газів від оксидів азоту

Як вже було сказано раніше, наступна група методів боротьби з викидами оксидів азоту, принципово відрізняється від уже описаних методів – зниження їх концентрації шляхом очищення димових газів.

Один з методів очищення газів, що йдуть від оксидів азоту заснований на їх відновленні або розкладанні до молекулярного азоту в присутності каталізаторів і при високих температурах.

Термокаталічне розкладання NO_x представляє великий практичний інтерес, оскільки його використовують для видалення оксидів азоту з вихлопів двигунів внутрішнього згоряння. З точки зору фундаментального каталізу на основі вивчення найпростішої реакції можна отримати дані про експериментальні стадії більш складних процесів; в даний час розробляються також каталічні системи, на яких каталітичне розкладання NO_x протікало б при низьких температурах. Було досліджено велике число каталізаторів розкладу оксидів азоту, активність яких залежить від складу каталізатора (іони металів,

оксиди металів), типу носія (оксид алюмінію, цеоліти, оксиди металів), ступеня промотування різними іонами.

У діапазоні температур при 300-900 °С монооксид азоту зазнає розкладання до азоту на досить простому каталізаторі – активованому вугіллі, просочений солями $Ng, Mn, Ba, Cu, Ni, Fe, Co$ або їх бінарними сполуками.

Каталітичне відновлення NO_x відновниками (реагентами) в присутності O_2 або повітря в загальному вигляді можна записати наступною схемою:

$$NO_x + B + O_2 = N_2 + BO + (1\text{-}y)\cdot O_2 \qquad (1.1)$$

де B – відновник, BO – продукти перетворення, y – кількість відновника яка витратиться на нього в реакції.

Як каталізатори використовують метали платинової групи, оксиди металів змінної валентності, цеоліти. Відновниками NO_x служать H_2, CO, CH .

Відновлення NO_x **воднем.** Водень, як відновник оксидів азоту, не знаходить широкого застосування через його високу вартість. Як каталізатор найбільш часто використовують оксиди Cu, Ni, Cr та їх суміші, а також Pt, Pd, Ru. Відновлення NO_x, може здійснюватися або до молекулярного азоту, або до аміаку.

Природа носія впливає на активність у реакціях Au-вмісних каталізаторів загальної формули Au\$MO_x$\$SiO_2$ та Au \$Mo_x$\$A1_2O_3$, де M = CO, La, Ce. Показано, що розмір часток Au в Au\$MO_x$\ SiO_2 більше, ніж у Au \$MO_x$\$Ai_2O_3$, внаслідок чого активність останнього каталізатора більше. Оксіди Ce та La збільшують селективність перетворення NO в N_2.

Максимальна конверсія NO в реакції залежить від типу каталізатора і температури. Так, для Pt\$Al_20_3$, вона становить 50% при 140 °С, а для Pt\$SiO_2$ - 75% при 90 °С; добавка води зменшує ступінь конверсії.

Відновлення NO_x **монооксидом вуглецю.** Реакцію відновлення проводять в присутності каталізаторів на основі оксидів Fe, Cu, Ni, Cr або благородних металів.

Активність каталізаторів в реакції при 200 °С зменшується в наступному ряду: $CuO\backslash CeO_2 \rightarrow CuO\backslash CeO_2\backslash A1_2O_3 \rightarrow CuO\backslash A1_2O_3$. Підвищення температури прожарювання з 800-1500 °С збільшує каталітичну активність шпінелі Cu-Cr-O, нанесеною на алюмосилікат.

Встановлено, що спосіб приготування каталізатора також надає вплив на його активність в реакції. Зразки $Rh\backslash Al_2O_3$, $Pt\backslash Al_2O_3$, $Rh\backslash SiO_2$, і $Pt\backslash SiO_2$, приготовлені методом просочування менш активні до спікання в реакції, ніж каталізатори, приготовлені методом зольгель-технології.

Відновлення NO_x **аміаком.** Для очищення від NO_x промислових газів і газів електростанцій в якості відновника використовують зазвичай аміак або його похідні. Для підвищення ефективності протікання процесу в окислювальній атмосфері, тобто у присутності повітря NH_3 беруть у надлишку проти стехіометричної кількості. При цьому NH_3 частково витрачається і на побічні реакції окислення.

Оскільки аміак за токсичністю можна порівняти з NO_x, відновлення NO_x аміаком вимагає точного дозування останнього. Крім того, в надлишку аміаку утворюється сульфат амонію, який негативно впливає на виробництво очисних установок. Для зручності застосування замість газоподібного аміаку використовують аміачну воду або інший N – який містить відновник, наприклад водний розчин карбаміду.

Відновлення NO_x вуглеводнями. Найбільш часто в якості відновників NO_x останнім часом використовують CH_4, C_3H_3. Активність вуглеводнів в реакції відновлення оксидів азоту визначається їх молекулярною масою і будовою. Великою реакційною здатністю володіють вуглеводні з великим числом атомів вуглецю в молекулі. Вуглеводні різного класу, але з однаковим

числом атомів, зазвичай розташовують в наступний ряд активності: алкіни→алкени→ароматичні вуглеводні→алкани.

Комерційний інтерес представляють перш за все ті каталізатори, які активні і в присутності яких протікання побічної реакції мінімальне. Каталізаторами служать благородні метали, оксиди перехідних металів і цеоліти. Типові температури реакцій 200-600 °С.

Селективне каталітичне відновлення оксидів азоту є потенціальним методом видалення NO_x з димових газів. Каталізатори складу $Ga_2O_3\backslash Al_2O_3$, $Ga_2O_3\backslash Al_2O_3 + Al_2O_3\backslash Ga_2O_3$, $Ga\backslash ZSM\text{-}5 + Ga_2O_3$ активні за наявності в вихідній газовій суміші 1% O_2. Каталізатор $Ga_2O_3\backslash A1_2O_3$ проявляє максимальну активність при утриманні $Ga_2C > 330$ в мас.%.

Ефективним відновником оксидів азоту є пропан. У багатьох роботах показано, що пропен так само ефективний як відновник NO_x в присутності каталізаторів різного складу. Так, наприклад, при використанні як відновників пропану або пропена $Ga_2O_3\backslash Al_2O_3$ більш активний, ніж цеолітний каталізатор, і при температурах, вище 723 К досягається повне відновлення NO до молекулярного азоту.

Для відновлення NO_x можна використовувати не тільки вуглеводні, але і кисневмісні сполуки. З кисневмісних похідних вуглеводень в реакції відновлення NO_x найбільш ефективні метиловий і етиловий спирти, а також диметиловий ефір.

Розгляд робіт, присвячених вивченню реакцій відновлення оксидів азоту різними реагентами, показує, що в присутності надлишку кисню ці реакції найбільш ефективно протікають при використанні аміаку, як відновник, і його похідних, а також різних вуглеводнів. Оскільки вуглеводні, в першу чергу метан, є більш доступними, а з екологічної точки зору мають явну перевагу перед аміаком, вони викликають найбільший інтерес як з точки зору фундаментальних, так і прикладних досліджень.

Каталізатори, застосовувані для каталітичного відновлення оксидів азоту, можна підрозділити на: цеоліти інших типів; оксиди металів; метали платинової

групи (Pd, Pt,Rh тощо); полікристали, монокристали; перовскіти; гетерополікислоти; вуглець і матеріали що містять графіт.

Промислові каталізатори процесу відновлення NO_x повинні володіти: високою активністю, яка забезпечувала б конверсію N_x, рівну 99% і вище, термостійкістю, механічною міцністю, низьким газодинамічним опором, стабільністю, стійкістю до H_2O, SO_2 та інших домішок, невисокою вартістю, тривалим терміном служби тощо. Перевага каталізаторів на основі благородних металів, нанесених на різні носії, в тому, що вони проявляють високу активність в сильно окисних умовах і при високих об'ємних швидкостях газового потоку. Метою подальших досліджень щодо розвитку цих систем є розширення температурного інтервалу проявлення їх максимальної активності, що може бути досягнуто або шляхом введення різних промоторів, застосуванням комбінацій їх з перехідними металами, або підбором відповідного носія.

Підвищений інтерес викликають багатокомпонентні і особливо багатофазні каталізатори, в тому числі і на основі перовскитів, набором необхідних фізико-хімічних властивостей. При використанні каталітичних систем, що представляють собою механічні суміші, можлива реалізація принципу поділу складної реакції на стадії, кожна з яких прискорюється своїм каталізатором. У декількох випадках такі системи виявляють синергетичні властивості, що дає значне збільшення їх активності.

В енергетиці часто застосовується селективне каталітичне відновлення (ВКВ) – метод очищення димових газів (Selective Catalytic Reduction - SCR-method). Широке впровадження цього методу проходила в рамках урядової демонстраційної кампанії США «Чисті технології спалювання вугілля».

Цілями демонстраційного проекту було дослідження: різноманітних составів і конфігурації каталізаторів; промислових методів їх використання в типових для США виробничих режимах спалювання високосірчистого вугілля; зносостійкості каталізаторів; використання каталізаторів при спалюванні вугілля інших, не типових для США складів. При цьому всі поставлені каталізатори відмінно впоралися із завданням очищення газів, що забезпечили видалення до

80% оксидів азоту. На випробуваному котлі застосовувалися, до того ж, пальники спеціальної конструкції з низьким утворенням NO_x.

Під час SCR-процесу NO_x, який складається передусім з NO з меншими кількостями NO_2, перетворюється на азот реакцією з NH_3 з каталізатором в присутності кисню. Невелика частка SO_2, також перетвориться в триоксид сірки (SO_3) по SCR процесу. Крім того, реакції можуть виробляти небажані побічні продукти: сульфат і бісульфат амонію $(NH_4)_2SO_4$, NH_4HSO_4. Непрореагований газ NH_3 також є шкідливою домішкою і істотно підтримувати його концентрацію нижче 5 ppm, переважно 2-3 ppm. Вартість каталізатора становить 15-20% вартості всього устаткування SCR; при цьому дуже важливо провести процес при високих температурах і високою швидкості потоку, щоб уникнути корозії.

Іншим прикладом очищення димових газів від оксидів азоту є каталітійний метод $SCONO_x$™ (компанії ABB), що має велику ефективність, до того ж запобігає проскакування аміаку, використовуваного в згаданом вище методі, при очищенні викидів від NO_x. Але і цей метод не позбавлений недоліків, до яких можна віднести те, що дана технологія застосовна тільки для газових турбін, що працюють на природному газі. Також є необхідною періодична регенерація каталізатора розведеним воднем.

Для очищення димових газів також застосовується селективний некаталітичного метод - СНКМ. Метод заснований на селективній взаємодії оксидів азоту з аміаком в зоні температур 1000-1100 °С.

Газоподібний аміак вводять рівномірно по поперечному перерізі газоходу котла, щоб забезпечити добре перемішування його з димовими газами, що визначається повноту реагування NH_3 з оксидами азоту.

Певні перспективи мають методи комплексного очищення димових газів від оксидів сірки та азоту. Для комплексного очищення можуть використовуватися ті ж реагенти, що і для очищення димових газів від оксидів сірки або від оксидів азоту. За однією з таких схем застосовані два абсорбера, зрошувані вапняною водою. У першому абсорбері здійснюється очищення

переважно від SO_2, у другому – від NO_x. Очищені охолоджені димові гази підігріваються за рахунок спалювання палива і викидаються в атмосферу через димову трубу. У першому абсорбері проходять реакції взаємодії в основному SO_2 з $CaCO_3$ і CaO з утворенням насиченого розчину $CaSO_4$, який є одним з кінцевих продуктів. У другому абсорбері з'єднання кальцію реагують з оксидами азоту і залишком SO_2 з утворенням $Ca(NO_2)_2$>CaSO $_3$ та $CaSO_4$. Отриманий розчин відводиться в випарну колону, де його упарюють і, після відділення з нього сульфіту і сульфату кальцію, подають в спеціальну піч, в якій міститься в розчині $Ca(NO_2)_2$ піддається розкладанню при температурі близько 700 °С. Суміш оксидів азоту в абсорбері доокислюється до діоксиду NO_2, який далі надходить у лінію димових газів перед другим абсорбером. Частина NO_2 розчиняється у воді і відводиться у вигляді розведеної азотної кислоти. Отриманий при розкладанні нітриту кальцію оксид кальцію змішується з $CaCO_3$, гаситься водою й у вигляді добавки подається в лінію рециркуляції на абсорбери. Метод пройшов перевірку на одній із зарубіжних ТЕС, але виявився надто складним.

У США розроблено комплексний метод очищення, на якому в димові гази додають діоксид азоту в такій кількості, щоб співвідношення NO_2 до SO_2 складало не менше 2 : 1. У цьому випадку при температурі близько 140 °С у присутності водяної пари відбувається реакція.

Певний інтерес представляє також озоновий метод комплексного очищення димових газів. Окислення шкідливих домішок озоном проводилося в парогазовому стані з подачею в реактор діспергованого розчину аміаку у воді.

Оксиди окислялись до NO_2 і SO_3, останні розчинялися у воді, створюючи відносні кислоти, які далі нейтралізували до отримання сульфату амонію. При прокачуванні через реактор 25% розчину NH_4OH в кількість 1386 т/год була досягнута ступінь уловлювання по NO_x близько 90%, по SO_2 - близько 80%. У ході роботи спостерігалася сильна корозія устаткування.

В останні роки інтенсивно розробляються нові методи очищення димових газів від оксидів сірки та азоту з використанням прискорювачів електронів з

метою ініціювання реакцій окислення NO_x і SCV. При опроміненні димових газах пучком електронів енергією до 1,5 МеВ між які входять до складу димових газів компонентами протікають іонно-молекулярні і радикальні хімічні-реакції за участю продуктів радіолізу парів води, діоксиду вуглецю, азоту і кисню. При подачі в зону реакцій аміаку утворюються в числі інших з'єднань сульфат та нітрат амонію, які уловлюються в сухому вигляді в електрофільтрах і використовуються в якості азотних добрив. Димові гази, що виходять з електронно-променевого реактора, не мають залишкової активністю, так як енергія пучка електронів в реакторі менше енергії фотоядерних реакцій. Біологічний захист необхідний лише для реактора і випромінювачів.

1.4 Висновки

1. Розгляд робіт, присвячених вивченню реакцій відновлення оксидів азоту різними реагентами, показує, що в присутності надлишку кисню ці реакції найбільш ефективно протікають при використанні аміаку, як відновник, і його похідних, а також різних вуглеводнів. Оскільки вуглеводні, в першу чергу метан, є більш доступними, а з екологічної точки зору мають явну перевагу перед аміаком, вони викликають найбільший інтерес як з точки зору фундаментальних, так і прикладних досліджень.

2. Каталізатори, застосовувані для каталітичного відновлення оксидів азоту, можна підрозділити на: цеоліти інших типів; оксиди металів; метали платинової групи (Pd, Pt,Rh тощо); полікристали, монокристали; перовскіти; гетерополікислоти; вуглець і матеріали що містять графіт.

3. Промислові каталізатори процесу відновлення NO_x повинні володіти: високою активністю, яка забезпечувала б конверсію N_x, рівну 99% і вище, термостійкістю, механічною міцністю, низьким газодинамічним опором, стабільністю, стійкістю до H_2O, SO_2 та інших домішок, невисокою вартістю, тривалим терміном служби тощо. Перевага каталізаторів на основі благородних металів, нанесених на різні носії, в тому, що вони проявляють високу активність

в сильно окисних умовах і при високих об'ємних швидкостях газового потоку. Метою подальших досліджень щодо розвитку цих систем є розширення температурного інтервалу проявлення їх максимальної активності, що може бути досягнуто або шляхом введення різних промоторів, застосуванням комбінацій їх з перехідними металами, або підбором відповідного носія.

РОЗДІЛ 2
АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА ТА ОКСИДІВ АЗОТУ У ПРОДУКТАХ ЗГОРЯННЯ

2.1 Аналіз існуючих уявлень про механізм горіння газового, рідкого і твердого палива

При горінні паливо і повітря змішуються і вступають у хімічну реакцію з одночасним виділенням великої кількості тепла. Залежно від типу змішання здійснюється горіння попередньо перемішаної або заздалегідь не перемішані сумішей. Крім того, в залежності від типу потоку факели поділяються на турбулентний і ламінарний.

У ламінарних факелах попередньо перемішаної суміші паливо і окисника змішуються до початку горіння і потік ламінарія. Прикладами такого полум'я можуть служити плоске ламінарне полум'я і полум'я бузеновського пальника. Попередньо перемішані суміші палива і повітря характеризуються величиною коефіцієнта надлишку повітря *a*, відповідно до якого, суміші можна підрозділити на багаті (a < 1), стехіометричні (a = 1) і бідні (a > 1).

Поширення вільного плоского ламінарного полум'я в бік свіжої суміші визначається швидкістю ламінарного горіння. Швидкість горіння залежить тільки від складу суміші (значення a), тиску і початкової температури суміші, що тліє. Якщо швидкість ламінарного горіння плоского полум'я менше швидкості потоку незгорілої свіжої суміші, то полум'я здувається. Більш високі швидкості потоку газу до фронту полум'я можливі, коли фронт полум'я розташовано під кутом до потоку газу, як у випадку конічного полум'я попередньо перемішаної суміші пальника. Вимірювання кута нахилу фронту полум'я, наприклад, по фотографії і швидкості потоку газу до фронту полум'я дають можливість визначити швидкість горіння ламінарного полум'я попередньо перемішаної суміші.

Експериментальні дослідження ламінарного полум'я попередньо перемішаної суміші дозволили провести вимірювання швидкості поширення полум'я, концентрації і температури у фронті горіння. Розвиток математичного моделювання процесів горіння зробило можливим описати експериментально спостережувані результати (поля концентрацій, температур, швидкостей) і передбачити поведінку системи при відсутності експериментальних даних. Рівняння збереження маси і енергії утворюють систему диференціальних рівнянь, яка вирішується в даний час чисельними методами на потужних комп'ютерах.

Рідкісним і вельми чудовим є випадок, коли важлива і значна інформація була отримана з аналітичного рішення моделі ламінарного теплового поширення полум'я. Можна припустили, що рішення не залежить від часу, тобто є квазістаціонарним, і вся хімічна кінетика може бути описана реакцією першого порядку. Далі, коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність і добуток щільності середовища та коефіцієнта дифузії постійні, тобто не залежать від просторової координати, зміна температури за рахунок різних швидкостей дифузії компонентів дуже малий і ставлення масового коефіцієнта дифузії D і коефіцієнта температуропровідності $\alpha = \lambda/\rho_{ср}$ (число Льюїса $Le = D/\alpha$) приблизно дорівнює одиниці. Якщо всі ці спрощення застосувати, то з отриманого ідентичного для збереження маси і енергії рівняння можна отримати швидкість поширення полум'я:

$$\upsilon_{лам} = (\alpha/\tau)^{1/2} \qquad (2.1)$$

де $\tau = \frac{1}{\kappa} = [A\, exp(-\frac{E}{RT})]^{-1}$- характерний час реакції при температурі $T<T_b$ (T_b - температура згорілих газів), яке повинно бути задано.

Згідно даної моделі швидкість поширення ламінарного полум'я залежить від коефіцієнта температуропровідності і від характерного часу реакції. Аналіз,

показує, що поширення полум'я обумовлено процесами дифузії і що необхідні градієнти підтримуються хімічною реакцією.

У разі одностадійної хімічної реакції аналіз по зазначеній моделі дає залежність швидкості поширення полум'я від тиску і температури:

$$\upsilon лам \approx p^{n/2-1}\, exp(-\frac{E}{2RT_b}) \qquad (2.2)$$

де n - порядок реакції, E - енергія активації, T_b - температура згорілих газів.

У ламінарних факелах попередньо неперемішаної суміші паливо і повітря перемішуються під час процесу горіння. Потік є ламінарним. Смолоскипи з попередньо неперемішаної сумішшю мають більш складну хімію реакцій, ніж смолоскипи з попереднім змішуванням, так як коефіцієнт надлишку повітря змінюється у них від нуля (чисте паливо) до нескінченності (чисте повітря). Паливо та окислювач дифундують до фронту полум'я завдяки градієнтам концентрацій, підтримуваним хімічними реакціями. Фронт полум'я не може поширюватися в бік палива без окислювача або в бік окислювача без палива. У результаті фронт полум'я знаходиться на кордоні розділу паливо - повітря, в зоні стехіометричної суміші та максимальної температури. На відміну від вище розглянутого факелу з попередньо перемішаної сумішшю, дані полум'я не поширюються спонтанно в бік свіжої суміші, і тому їх не можна охарактеризувати швидкістю поширення ламіодинарного полум'я.

Однак у більшій частині технічних пристроїв, в тому числі і в котельнях установки, горіння відбувається не в ламінарному, а в турбулентному факелі. У турбулентному потоці процес перемішування значно інтенсифіковано. Це дозволяє створювати конструкції істотно менших розмірів. Турбулентне горіння є складним і ще не повністю вивченим явищем, математичної моделі якого ще не досить розвинені.

У турбулентному факелі попередньо перемішаної суміші фронт полум'я поширюється в турбулентний потік. При невеликій інтенсивності

турболентності формуються викривлені фронти ламінарного полум'я. У цьому випадку турбулентне полум'я можна розглядати як ансамбль мікроламінарних полуменів попередньо перемішаної суміші. Прикладом є процес спалювання в двигунах внутрішнього згоряння з іскровим запалом.

Перевагою горіння попередньо перемішаної суміші є те, що можна краще керувати процесом горіння. Попереднє перемішування, який утворює бідну суміш, дозволяє знизити рівень температур при горінні і, таким чином, зменшити утворення монооксиду азоту. Крім того, скорочується можливість сажеутворення, яка виникає при горінні багатьох суміш.

Незважаючи на певні переваги, спалювання попередньо перемішаних сумішей в техніці широко не застосовується через небезпеку займання і вибухів.

Турбулентні смолоскипи з попередньо не перемішаної сумішшю найбільш поширені в практиці горіння – у промислових і енергетичних пальниках і котлах, коли паливо і повітря змішуються безпосередньо в топкових заходах. У техніці використовують вельми складні і досконалі системи перемішування, що вимагає розробки чисельного моделювання процесів турбулентного горіння не перемішаних середовищ. Ці факела називаються також дифузійними, оскільки дифузія палива і повітря в зону горіння є більш повільним процесом у порівнянні зі швидкостями хімічних реакцій. Турбулентні факела можна розглядати як сукупність великої кількості ламінарних пламенів.

Горіння рідких палив пов'язано зі зміною фазового стану і наявністю кордонів розділу середовищ. Рідке паливо впорскується в газоповітряний потік, в якому відбувається горіння. Турбулентні коливання тонкої плівки рідини, створюваної форсункою, викликають її розпад і перетворення в щільну хмару капель, що надходять у зону горіння. Підведення тепла до крапель призводить до випаровування палива в газове середовище і початку горіння в газовій фазі. Навколо крапель утворюється полум'я попередньо не перемішаної суміші парів рідини.

Рідкі котельні палива є продуктами перегонки нафти і складаються з компонентів з різними температурами кипіння. При нагріванні спочатку

випаровуються легкі рідкі фракції, потім фракції з високою температурою кипіння. У результаті залишається тверда частина, яка містить коксовий залишок і золу.

Горіння мазутного факела можна розглядати, як горіння безлічі окремих крапель. Розрізняють три фази горіння краплі: прогрів до температури кипіння, випаровування палива в газову фазу і утворення горючої суміші (розмір краплі зменшується в часі пропорційно квадрату діаметра краплі), власного горіння, коли попередньо не перемішана суміш запалюється й горить навколо краплі (діаметр краплі зменшується в часі також по d-закону).

Константа випаровування залежить від різних властивостей краплі і навколишньої каплі газової фази. Займання у газовій фазі відбувається після періоду індукції (затримки займання). Полум'я, що оточує краплю, призводить до додаткового її нагрівання і прискорення процесу випаровування. У дійсності каплі рухаються відносно навколишнього газового середовища. Це також впливає на займання і горіння крапель.

При розгляді горіння струменя рідини слід враховувати, що при її розпаді утворюється щільна хмара крапель різного розміру, що взаємодіють один з одним і з турбулентним потоком газів. Розподіл діаметрів крапель не є однорідним. Вид функції розподілу та її подальша зміна визначаються природою рідкого палива, структурою і властивостями потоку в факелі, конструкцією диспергатора.

Горіння вугілля (твердого палива) є ще більш складним процесом. Вугілля неоднорідна хімічна сполука, а суміш великого числа вуглеводневих сполук, структура яких досить складна. Вугілля містить горючі леткі і нелеткі з'єднання, а також негорючі сполуки, золу. При горінні вугілля можна виділити три стадії процесу: піроліз вугілля, в результаті якого з вугілля виділяються леткі сполуки і утворення, що містить значну кількість вуглецю й золу, а саме твердий продукт – напівкокс; горіння летких сполук; горіння коксу.

Піроліз вугілля (термічний розпад і дегазація) відбувається при температурі вище 600 К з утворенням напівкоксу, гудрону і летких компонентів.

Піроліз залежить від багатьох фізико-хімічних процесів і характеристик вугілля. Летючі з'єднання утворюються шляхом виділення функціональних груп, які потім утворюють CH_4, H_2, CO, HCN та інші. Розрив хімічних зв'язків у вугіллі приводить до відновлення фрагментів, здатних до утворення гудронів. За цими процесами наступає дифузія летючих компонентів до поверхні частинок вугілля, де вони випаровуються і згорають.

Горіння летючих відбувається в газовій фазі. Процеси, які при цьому виходять (випаровування, дифузія в газову фазу і горіння), аналогічні при горінні краплі. Однак склад летких компонентів не завжди визначено.

Напівкокс складається в основному з вуглецю і випаровування з подальшим окисленням в газовій фазі практично не відбувається. Замість цього вуглець на поверхні твердої фази окислюється до CO молекулами $CO_г$ (і $O_г$) з газової фази, які атакують поверхню частинки. Тепер вуглець міцно пов'язаний з киснем і має слабкий зв'язок з поверхнею частинки. Тому що окис вуглецю, що утворюється, вже має високий тиск насичення парів і швидко покидає поверхню частинки, переходячи в газову фазу, де молекули CO окислюються з відтворенням CO_2. Гетерогенне горіння коксової частки описується складними процесами адсорбції молекул на поверхні, поверхневих реакцій, десорбції продуктів реакцій, дифузії крізь пори і дифузії на поверхні частиць. Зменшення швидкості будь-якого із зазначених процесів буде обмежувати швидкість процесу горіння. Так, експонентна температурна залежність швидкостей поверхневих реакцій призводить до того, що при низьких температурах вони є лімітуючою стадією всього процесу. При високих температурах їх реакції стають настільки швидкими, що дифузія в порах і газова дифузія стають лімітуючими стадіями всього процесу.

2.2 Закономірності утворення оксидів азоту при спалюванні органічних палив

2.2.1 Утворення оксидів азоту

Викиди оксидів азоту складаються в основному з моноксиду азоту NO, а також, у менших концентраціях, містять діоксид азоту NO_2 і закис азоту N_2O. Оксиди азоту (NO_x) є попередниками фотохімічного смогу, сприяють випаданню кислотних дощів і виснаження озону в атмосфері. Таким чином, оксиди азоту представляють собою забруднюючі речовини.

Утворення оксидів азоту при горінні відбувається шляхом окислення азоту повітря (термічне і «швидке» окислення); окислення азоту палива (паливне окислення); а також поглинання оксидів азоту при допалюванні.

Для визначення емісії оксидів азоту слід розглянути рівняння переносу для концентрації монооксиду азоту (NO). Якщо джерелом азоту є паливо, вводиться додаткове рівняння переносу для проміжних продуктів реакції (HCN або NH_3). Рівняння переносу для оксидів азоту вирішуються, ґрунтуючись на заданому полі течії і математичному описі процесу горіння. Іншими словами, вихід оксидів азоту визначається, виходячи з результатів розрахунку горіння. Таким чином, очевидно, що необхідною умовою для ділення оксидів є досить детальні розрахунки самого процесу горіння. Наприклад, при температурах полум'я близько 2200 К, кожне подальше збільшення температури на 90 К прискорює термічне окислення азоту в два рази. По можливості необхідно також враховувати фактори турбулентності, радіаційного теплообміну, хімічної кінетики.

Одержувані результати точні лише настільки, наскільки точні вихідні дані в поєднанні з адекватно підібраною фізичною моделлю процесу. Хоча в більшості випадків розрахунковим шляхом вдається з достовірністю передбачити лише тенденції змін, але не власне кількість які виникають оксидів азоту, точне прогнозування параметричних трендів в конкретній системі

дозволяє заощадити на лабораторних тестах і промислових випробуваннях, припинити окремі етапи проектування і в той же час урізноманітнити можливі варіанти технічних рішень при розробці нових пристроїв, які забезпечують горіння. У цьому і полягає реальне практичне значення розрахунків утворення оксидів азоту.

У ламінарному полум'ї (на молекулярному рівні це можна віднести і до турбулентного полум'я) утворення оксидів азоту є результатом чотирьох окремих хімічних процесів з різною кінетикою: термічне, «швидке» і паливне окислення, а також процес відновлення Термічне окислення представляє собою окислення атмосферного азоту, присутнього в повітрі для горіння. «Швидке» окислення – результат високошвидкісних реакцій у фронті горіння. Паливне окислення пов'язано з атомами азоту, входять до складу палива. У ході відновлення загальний вихід оксидів азоту знижується за рахунок реакції NO з вуглеводнями.

2.2.2 Рівняння переносу для оксидів азоту

Розглядається рівняння переносу маси для NO з урахуванням конвекції, дифузії, утворення і поглинання. який підхід є загальноприйнятим та описаним на фундаментальний фізичний закон збереження маси. Ефект «затримки», що має місце відповідно з лагранжевим поданням по системах відліку, обліковується як конвекції, через запровадження відповідних членів у визначальні рівняння, написані для Ейлера системи відліку. Термічне і «швидке» окислення описуються одним рівнянням перенесення для NO:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho \upsilon Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho \sigma \nabla Y_{NO}) + S_{NO} \qquad (2.3)$$

У паливного окислення механізм складніший (це буде обговорюватися в розділі 2.2.5). Його опис вимагає стеження за проміжними продуктами хімічних

реакцій, що містять азот. У разі паливного окислення, крім рівняння 2.3, додатково розглядається рівняння переносу для HCN або

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{HCN}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{HCN}) = \nabla \cdot (\rho \sigma Y_{HCN}) + S_{HCN} \quad (2.4)$$

для NH_3:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NH_3}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{NH_3}) = \nabla \cdot (\rho \sigma Y_{NH_3}) + S_{NH_3} \quad (2.5)$$

де $Y_{HCN}, Y_{NH_3} u Y_{NO}$ - масові частки HCN, NH_3 та NO в газовій фазі.

Члени S_{HCN}, S_{NH_3} і S_{N0} будуть визначені в наступних розділах стосовно до різних механізмів окислення азоту.

2.2.3 Термічне окислення азоту повітря

Термічне окислення визначається послідовністю у вищій мірі температурно-обумовлених хімічних реакцій, відомих як узагальнений механізм Зельдовича. Дві основних реакції, які визначають термічне окисня атмосферного азоту, такі:

$$O + N_2 = N + NO \quad (2.6)$$

$$N + O_2 = O + NO \quad (2.7)$$

Ще одна реакція, яка стосується процесу термічного окислення, особливо ефективна в умовах, близьких до стехіометричних, а також у сумішах з нестатком повітря (багатих сумішах):

$$N + OH = H + NO \quad (2.8)$$

Константи швидкостей реакцій при термічному окислюванні для цих реакцій були виміряні в численних експериментальних дослідженнях, результати яких, у свою чергу, були піддані критичній оцінці в роботах Baulch і Hanson and Salimian. Формули для розрахунку коефіцієнтом швидкості реакцій (2.6-2.8) обрані, погодившись з оцінкою Hanson and Salimian.

$$k_1 = 1{,}8 \cdot 10^8 e^{-38370/T} \quad (2.9)$$

$$k_{-1} = 3{,}8 \cdot 10^7 e^{-425/T} \quad (2.10)$$

$$k_2 = 1{,}8 \cdot 10^4 e^{-4680/T} \quad (2.11)$$

$$k_{-2} = 3{,}8 \cdot 10^3 e^{-20820/T} \quad (2.12)$$

$$k_3 = 7{,}1 \cdot 10^7 e^{-450/T} \quad (2.13)$$

$$k_{-3} = 1{,}7 \cdot 10^8 e^{-24560/T} \quad (2.14)$$

У вищенаведених виразах k_1, k_2, k_3 - константи швидкості прямих реакцій (2.6-2.8), відповідно, а k_{-1}, k_{-2}, k_{-3} - відповідних зворотних реакцій. Всі константи вимірюються в $м^3$/гмоль·с.

Результуюча швидкість утворення NO за допомогою реакцій (2.6-2.8) записується так:

$$\frac{\partial [NO]}{\partial t} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OII] - k_{-1}[NO][N] - k_{-2}[NO][O] - k_{-3}[NO][II] \quad (2.15)$$

Для обчислення швидкостей утворення NO і N потрібне знання концентрату O, H і OH.

Швидкість окислення азоту повітря значна лише при високих температурах (вище 1800 К) оскільки вступ азоту в реакцію вимагає розірвання пружного потрійного зв'язку в молекулі N_2 (енергія дисоціації 941кДж/г·моль). Цим ефектом обумовлена висока енергія активації для реакції (2.6), що робить її лімітуючою стадією узагальненого механізму Зельдовича. Енергія активації для

окислення атомів N, навпаки, невелика. При достатній кількості кисню швидкість поглинання вільного азоту дорівнює швидкості його утворення, приводячи систему в квазістаціонарний стан. На практиці це припущення справедливо майже завжди, за винятком випадків надзвичайної нестачі повітря при горінні. Отже, швидкість утворення NO можна висловити як

$$\frac{\partial[NO]}{\partial t} = 2k_1[O][N_2]\frac{(1-\frac{k_{-1}k_{-2}[NO]^2}{k_1[N_2]k_2[O_2]})}{(1+\frac{k_{-1}[NO]}{k_2[O_2]+k_3[OH]})}\,(гмоль/м^3 \cdot с) \qquad (2.16)$$

З рівності (2.16) ясно, що швидкість утворення NO буде рости зі збільшенням концентрації кисню. Також слід зазначити, що термічне окислення сильно залежить від температури, але не залежить від різновиду палива, що спалюється. Насправді, виходячи з лімітуючої швидкості, яка описується рівністю (2.10), швидкість термічного окислення азоту подвоюється при кожному наступному збільшенні температури на 90 К, починаючи з 2200 К.

Рішення рівняння (2.16) вимагає підстановки значень концентрацій не тільки стабільних молекул (тобто O_2, N_2), але також атомарного кисню і вільних радикалів ОН. Згідно з пропозицією Зельдовича, механізм термічного окислення можна відокремити від основного процесу горіння, вважаючи значення температури, концентрацій стабільних молекул і концентрацій радикалів відповідними рівноважним умов. Однак спостерігаються значення концентрації радикалів, особливо атомів О, перевищують рівноважні (так званий «ефект парціальної рівноваги»). Дослідження показують, що допущення в розрахунках рівноважної (замість дійсної) концентрації атомарного кисню тягне за собою недооцінку (до 28% для ламінарного горіння метану) кількості, що утворюються в зоні полум'я оксидів азоту.

Докладних досліджень підвищеної концентрації вільних радикалів в турбулентному полум'ї проводилося не так вже й багато. Проте в даний час певного висновку про вплив ефекту парціальної рівноваги на окислення азоту в турбулентному полум'ї не досягнуто. Peters і Donnerhack вважають, що не більше

25% надлишкового термічного окислення може пояснюватися ефектом парціальної рівноваги, решта визначається головним чином газодинамічними явищами.

Враховуючи розбіжності серед дослідників, для визначення концентрації атомарного кисню пропонуються до розгляду три методи: рівноважний, парціальний-рівноважний або метод розрахункової концентрації.

Рівноважний метод. Кінетика термічного окислення азоту набагато повільніше, ніж у основного набору реакцій окислення вуглеводнів, і таким чином велика частина «термічних» окислів азоту завершує своє формування вже по завершенні власне горіння. Тому відокремлення процесу термічного окислення від основного механізму горіння часто є правомочним, при цьому з термічного окислювання можуть бути зроблені, виходячи з передбачувану про рівновагу в реакціях горіння. Такий підхід суттєво спрощує вирахування. Припущення про рівновагу може бути виправдане тою обставиною, що при високих температурах полум'я значимість перевищення вільними радикалами рівноважних концентрацій знижується. Рівноважна концентрація атомарного кисню може бути отримана з виразу

$$[O] = k_\rho [O_2]^{1/2} \tag{2.17}$$

яке при розкритті k_ρ приймає вигляд

$$[O] = 3.97 \times 10^5 T^{-1/2} e^{-31000/T} \text{гмоль}/\text{м}^3 \tag{2.18}$$

де Т вимірюється за Кельвіном.

Парціальний-рівноважний метод. Метод може бути уточнений за допомогою обліку трикомпонентних реакцій як складової процесу дисоціації-рекомбінації O_2:

$$O_2 + M = O + O + M \tag{2.19}$$

При цьому рівність (2.18) замінюється таким виразом:

$$[O] = 36.64T^{1/2}[O2]^{1/2}e^{-27123/T} \quad (2.20)$$

яке, як правило, дає більше значення парціальної концентрації атомів О.

Метод використання розрахункової концентрації атомарного кисню. У випадках, коли система добре описується моделями квантової хімії, концентрація атомів О може бути безпосередньо виведена з їх локальної масової частки. Для визначення концентрації вільних радикалів ОН застосовується один з трьох методів визначення концентрації вільних радикалів ОН: виняток ОН з розрахунків термічного окислення, парціальний-рівноважний метод або використання розрахункової концентрації ОН.

Метод виключення. У рамках цього підходу реакція узагальненого механізму вважається зневажлива у відповідності з наступним:

$$k_2[O_2]_{eq} \rhd k_3[OH]_{eq}$$

Таке припущення справедливе для горіння з досить великою подачею повітря і для більшості випадків прийнятною.

Підводячи підсумок вищесказаного, швидкість термічного окислення азоту повітря можна описувати рівнянням (2.16). Концентрація атомарного кисню, що входить в рівняння (2.16), обчислюється за формулою (2.18) при допущенні по хімічній рівновазі в системі, за формулою (2.20) при допущенні при парціальний рівновазі, або виходячи з локальної масової частки атомів кисню. Взявши за основу рівняння переносу для NO (формула 2.3), значення виходу NO в результаті термічного окислення записуємо як

$$S_{thernal,NO} = M_{ш,NO}\frac{\partial[NO]}{\partial t} \quad (2.22)$$

де M_{wNO} - молекулярна маса NO, а $\partial[NO]/\partial t$ обчислюється за формулою (2.16).

2.2.4 «Швидке» окислення азоту повітря

Відомо, що при горінні вуглеводневого палива утворення оксидів азоту може проходити швидше, ніж пряме окислення молекул азоту киснем (тобто термічне окислення).

Наявність альтернативного механізму, що веде до утворення оксидів азоту, було вперше встановлено Fenimore і позначено як «швидке» окислення азоту. Надійні дані свідчать про істотний внесок саме цього механізму в загальний вихід NO_x для деяких режимів горіння – таких як низькотемпературне, горіння з недоліком повітря, з інтенсивною конвекцією (коротичним часом індукції). Такі умови можуть створюватися в пристроях відчиненого спалювання, при ступінчастому спалюванні, в газових турбінах.

В даний час внесок «швидкого» окислення в загальну кількість NO_x, вироблюване стаціонарними камерами згоряння, невеликий. Однак, після того як використання нових технологій (особливі конструкції пальників, геометричні модифікації топок) призвело до значних успіхів у зниженні викидів окислів азоту, практична значущість «швидкого» окислення може зрости.

«Швидке» окислення, як складова загального виходу NO_x, найбільш інтенсивним збагаченому паливом полум'я. Процес являє собою складну серію реакцій з утворенням численних можливих проміжних з’єднань. Основним у цьому хімічному каскаді прийнято вважати наступне:

$$CH + N_2 = HCN + N \quad (2.23)$$

$$N + O_2 = NO + O \quad (2.24)$$

$$HCN + OH = CN + H_2O \quad (2.25)$$

$$CN + O_2 = NO + CO \quad (2.26)$$

Участь у «швидкому» окисленні приписується цілому ряду сполук, народжуваних при фрагментації вуглеводневого палива (наприклад, CH, CH_2, C, C_2H), однак основний вклад забезпечує CH (рівняння 2.23), а також CH_2 - через

$$CH_2 + N_2 = HCN + NH \quad (2.27)$$

Продукти цих реакцій можуть вести до утворення амінів та ціаністих з'єднань, які, у свою чергу, служать попередниками NO в реакціях, схожих на ті, що мають місце при окисленні азоту палива:

$$HCN + N = N_2 + \ldots\ldots \quad (2.28)$$

«Швидке» окислення пропорційне числу атомів вуглецю, що знаходяться в одиниці об'єму, і не залежить від різновиду вуглеводню-попередника. Кількість утворюється HCN зростає з концентрацією вуглеводневих радикалів, які, у свою чергу, збільшуються зі зменшенням коефіцієнта надлишку повітря. У міру зменшення коефіцієнта надлишку повітря, вихід «швидкого» NO_x спочатку зростає, потім проходить пік, і нарешті йде на спад у зв'язку з браком кисню. Реакція (2.23) є основоположною. Порівняння розподілів щільності ймовірності для місцеположення піку NO_x з аналогічними розподілами для піку CH демонструє їхнє близьку відповідність, показуючи, що більша частина NO_x біля нижньої межі полум'я являє собою продукт «швидкого» оксиду через CH-реакцію. Вважаючи, що швидкість «швидкого» окислення лімітується реакцією (2.23), пишемо:

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_0[CH][N_2] \quad (2.29)$$

У наявності, все ж таки, якась невизначеність. На підставі реакцій (2.23-2.27) можна зробити висновок, що для прогнозування «швидкого» окислення в полум'ї потребує математично зв'язати кінетику для NO_x з власне механізмом горіння вуглеводнів. Механізми горіння вуглеводнів багатоступінчасті і, як уже говорилося, надзвичайно складні. Тому пропонується використовувати глобальний кінетичний параметр, виведений De Soete. Експериментальні

значення загальної величини викидів NO_x порівнюються зі швидкістю їх утворення, розрахованої шляхом чисельного інтегрування емпіричних швидкостей сумарних реакцій утворення NO_x і N_2.У результаті вдалося показати, що підсумкова кількість «швидкого» окислення може бути передбачена за допомогою формули:

$$\frac{d[NO]}{dt} = (NO_x) - (N_2) \tag{2.30}$$

На ранніх стадіях формування полум'я, коли «швидке» окислення проходить в умовах нестачі повітря, концентрація атомарного кисню висока, і радикал N витрачається майже виключно на утворення NO_x (а не N_2). Тому підсумкова швидкість «швидкого» окислення буде наближено дорівнювати швидкості сумарної реакції утворення NO_x:

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_{pr}[O_2]^a[N_2][FUEL]e^{-E_a/RT} \tag{2.31}$$

Для горіння етилену (C_2H_4) у повітряному полум'ї

$$k_{pr} = 1.2 \times 10^7 (RT/p)^{a+1} \qquad E_a = 60 ккал/гмоль$$

де a - порядок реакції по кисню, R - універсальна газова стала, p - тиск (всі - в одиницях CI).

Встановлено, що вихід «швидких» NO_x має перший порядок по відношенню до концентрацій азоту і палива, у той час як порядок реакції по кисню, залежить від умов експерименту.

Рівняння виходу «швидких» NO_x (2.31) було піддано перевірці на експериментальних даних, отриманих Backmier для різних концентрацій суміші та основних видів вуглеводневого палива. Результати показали, що для умов з

нестачею повітря і для високомолекулярних видів топлива така модель менш ефективна. Щоб зменшити помилку і адекватно прогнозувати «швидке» окислення для будь-яких умов, модель De Soete була модифікована з використанням наявних експериментальних даних. Для газоподібних аліфатичних вуглеводнів введений в розрахункові формули фактор корекції, що включає в себе і вид палива (тобто число атомів вуглецю в молекулі), і співвідношення повітря-паливо. Тоді рівняння (2.31) приймає вид

$$\frac{d[NO]}{dt} = fk'_{pr}[O_2]^a[N_2][FUEL]e^{-E'_a/KE} \quad (2.32)$$

так що показник виходу NO в результаті «швидкого» окислення представляє собою

$$S_{prompt,NO} = M_{w,NO}\frac{d[NO]}{dt} \quad (2.33)$$

У цих рівняннях

$$f = 4.75 + 0.0819n - 23.2\varphi + 32\varphi^2 - 12.2\varphi^3 \quad (2.34)$$

n - число атомів вуглецю у молекулі для вуглеводневого палива, а еквівалентне співвідношення (величина зворотна коефіцієнту надлишку повітря).

Фактор корекції, застосовуваний для аліфатичних алканів (C_nH_{2n+2}) і для значень еквівалентного співвідношення 0 між 0,6 і 1,6, являє собою криву, апроксимовану відповідно з експериментальними даними. Якщо значення співвідношення еквівалентності лежить поза зазначеної області, то необхідно дотримуватися відповідних обмежень у використанні моделі.

У даному випадку поняття «еквівалентного співвідношення» відноситься до сумарного співвідношення для полум'я в цілому, а не будь-якому просторово варіюючому параметру потоку. Для складних геометрій з безліччю пальників це

може привести до деякої невизначеності в специфікації N. Однак, оскільки вклад «швидкого» окислення в загальний вихід NO_x в таких системах дуже малий, суттєві викривлення в результатах малоймовірні.

Порядок реакції по кисню залежить від характеру полум'я. Порядок реакції по кисню однозначно співвідноситься з мольної долею кисню в полум'я:

$$a=\begin{cases}1.0 & XO_2 \le 4.1\times10^{-3}\\ -3.95-0.9\ln X_{O_2} & 4.1\times10^{-3} \le X_{O_2} \le 1.11\times10^{-2}\\ -0.35-0.1\ln X_{O_2} & 1.11\times10^{-2} < X_{O_2} < 0.03\\ 0, & X_{O_2} \ge 0.03\end{cases} \qquad (2.35)$$

2.2.5 Утворення оксидів азоту

Добре відомо, що азотвмісні органічні сполуки, присутні у рідкому і твердому викопному паливі, можуть служити додатковим джерелом азоту, окислюваного в процесі горіння. Враховувати внесок азоту палива особливо важливо для топкового мазуту та вугілля, типовий вміст азоту в яких становить 0.3-2% маси. Дослідження показали, що більша частина азоту у важких нафтових фракціях (і, цілком ймовірно, у вугіллі) входить до составу гетероциклічних сполук. Найважливішими з цих сполук вважаються піридин, хінолін, гетероциклічні аміни.

Ступінь переходу азоту палива в NO_x (хімічні окислення) залежить від локальних характеристик горіння і вихідної концентрації азотвмісних з'єднань, які вивільняються в газоподібну фазу при нагріванні крапельок або часток палива на стадії видалення летючих компонентів. При термічному розпаді цих сполук (анілін, піридин, пірол тощо) в зоні реакції утворюються вільні радикали (такі як HCN, NH_3, N, CN і NH), які можуть бути перетворені в NO_x. Вільні радикали (тобто вторинні проміжні сполуки азоту) вступають в реакції з двох

конкуруючими напрямками. Цьому хімічному механізму присвячено кілька детальних досліджень.

Недавні дослідження показали, що ціановодень, мабуть, є головним вторинним проміжним продуктом, якщо азот палива знаходився в ароматичній або циклічній формі. Якщо ж азот палива був у складі аліфатичних амінів, головним продуктом його конверсії стає аміак.

Механізми окислення азоту газоподібного та рідкого палива мають різну фізичну основу, але одні й ті ж хімічні шляхи.

Усереднена лімітуюча швидкість реакції RCf обчислюється, виходячи з моделі горіння по Magnussen, так що розрахунки по азоту газоподібного палива можливі лише в разі використання узагальненої моделі з детермінованою кінцевою швидкістю.

Передбачається, що азот містить як летючі компоненти вугілля, так і напівкокс. Немає підстав вважати, що азот розподілений між летючими і напівкоксом рівномірний, тому при розрахунках його вмісту у фракціях вугілля задається окремими величинами.

Якщо проміжним з'єднанням служить HCN, можна розглядати два варіанти опису процесу. Якщо проміжним з'єднанням служить NH_3, також можливо розглядати два варіанти опису процесу, подібні з такими для HCN.

У першому з пропонованих механізмів (рис. 2.1) центральним є допущення, що весь азот напівкоксу переводиться в HCN, який потім частково перетворюється в NO.

Другий механізм з HCN в якості проміжного з'єднання (рис. 2.2) будується на основі припущення, що весь азот напівкоксу безпосередньо переходить в NO.

Другий HCN-механізм має тенденцію призводити до великих викидів NO_x ніж перший. Однак для конкретних випадків важко передбачити, який із них продуктивніше.

Згідно Lockwood, азот напівкоксу вивільняється в газоподібну фазу вже у вигляді NO, внаслідок безпосереднього окислення, переважно як продукт десорбції.

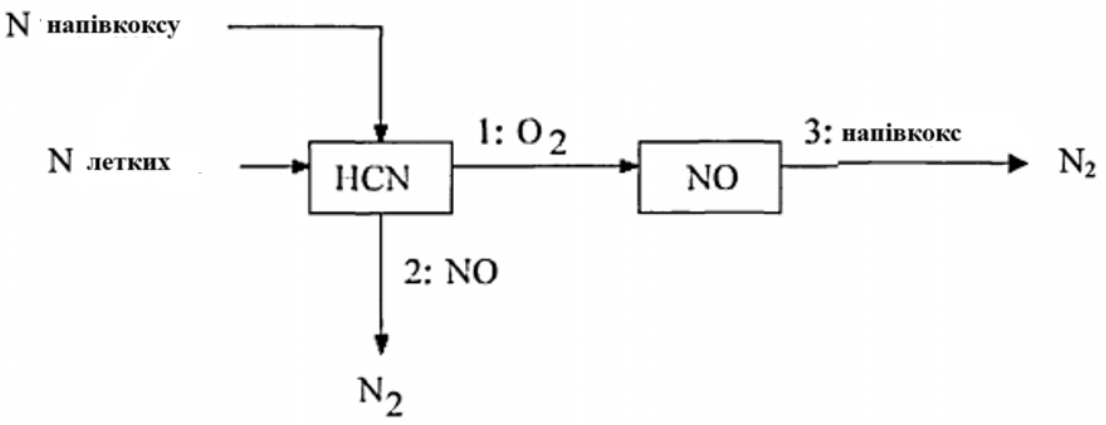


Рисунок 2.1 – Механізм окислення азоту (I варіант)

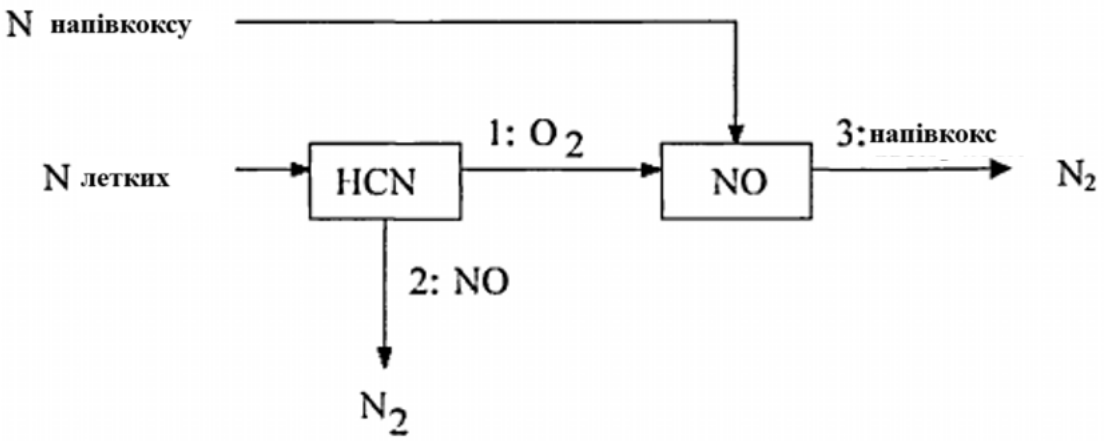


Рисунок 2.2 – Механізм окислення азоту (II варіант)

Гетерогенна реакція за участю напівкоксу представляє собою головним чином процес адсорбції, швидкість якого прямо пропорційна площі поверхні пор. У адсорбентів промислового типу площа поверхні складає від 100 тис. до 2 млн.м^2/кг, в залежності від мікроскопічної структури. Типова площа для вугілля складає 25000 м/кг, і це значення зазвичай використовується в розрахунках.

Розрахунок показника виходу NH_3 з напівкоксу обумовлюється вибором схеми III або IV.

Для першого з розглянутих механізмів з NH_3 в якості проміжного продукту (схема III) мається на увазі, що весь азот напівкоксу переводиться в NH_3, який потім частково перетворюється на NO.

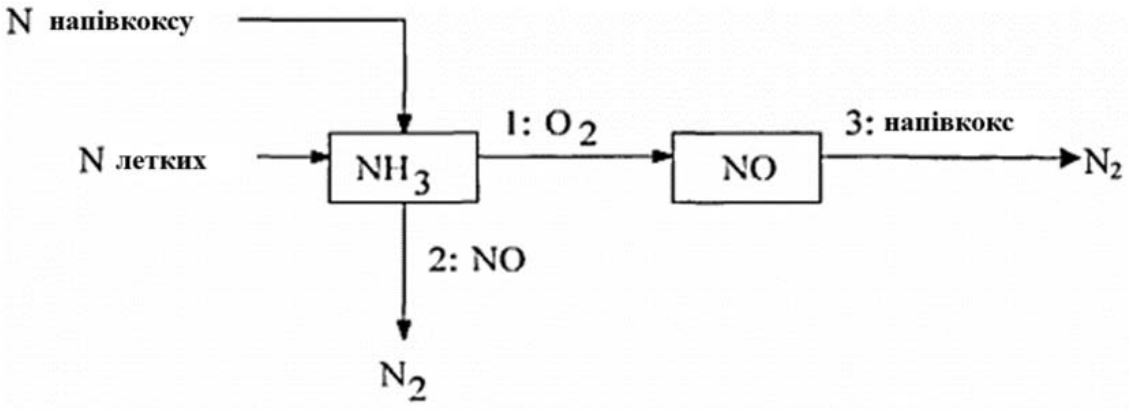


Рисунок 2.3 – Механізм окислення азоту (III варіант)

Відповідно до цієї схеми, весь азот напівкоксу переходить в NH_3.

У випадку дії другого механізму з NH_3 (схема IV) весь азот напівкоксу напряму переходить в NO.

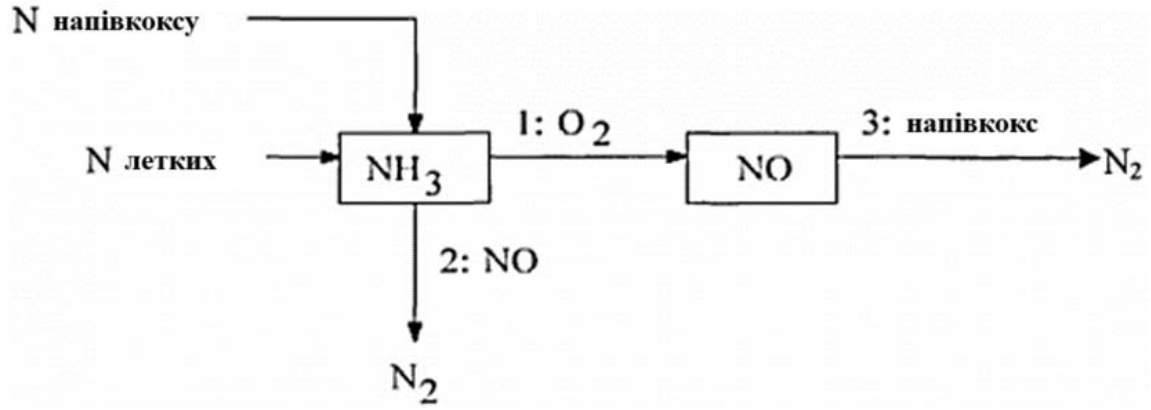


Рисунок 2.4 – Механізм окислення азоту (IV варіант)

Азот напівкоксу вивільняється в газоподібну фазу вже у вигляді NO, внаслідок безпосереднього окислення, переважно як продукт десорбції.

Другий NH_3-механізм має тенденцію призводити до великих викидів NO_x, ніж перший. Однак для конкретних випадків важко передбачити, який із них продуктивніше.

Розрахунок показника виходу NH_3 з напівкоксу обумовлюється вибором схеми (III або IV).

2.3 Утворення оксидів азоту в турбулентних факелах

Всі кінетичні механізми утворення і руйнування NO_x, описані в попередніх розділах, були отримані виходячи з лабораторних експериментів з використанням або ламінарного полум'я попередньо перемішаної суміші, чи ударної труби, для яких умови молекулярної дифузії цілком визначені. Процес вихрового змішання призводить до тимчасових флуктуацій температури і концентрацій речовин, і таким чином впливає на властивості полум'я.

Співвідношення між швидкістю утворення NO_x, температурою та концентраціями речовин дуже нелінійні. Отже, при прогнозуванні середніх значень викидів NO_x використання у будь-якій моделі усереднених за часом значень температури і складу приведе до суттєвих помилок. Флуктуації температури і складу слід приймати до уваги, використовуючи функції щільності ймовірності, які описують зміну в часі.

Для розрахунку концентрації NO необхідно вичислити усереднену за часом швидкість утворення NO для кожної точки області, використовуючи усереднені дані про стать потоку.

Способи моделювання середньої швидкості реакції в умовах турбулентності спираються або на «миттєві» методи, або на функції розподілу щільності імовірності (РЩІ).

РЩІ -метод можна застосовувати для теоретичного опису турбулентного потоку. При розрахунку викидів NO_x використовується функція розподілу щільності вірогідності з однією змінною, що відбиває нормалізовану температуру або масову частку речовин, або те й інше. У разі використання моделі горіння без попереднього перемішування застосовується також функція розподілу щільності імовірності з однією або двома змінними на основі фракцій суміші. Середні значення незалежних змінних, необхідні для побудови функції розподілу, знаходяться з рішення рівнянь переносу.

Середня швидкість реакції в умовах турбулентності може бути описана на основі миттєвої швидкості і розподілу щільності ймовірності однієї перемінною (або об'єднує різні змінні).

Функція розподілу щільності ймовірності використовується для «зважування» по відношенню до миттєвих швидкостей утворення NO з подальшим інтегруванням по відповідним інтервалам для отримання середньої швидкості реакції в умовах турбулентності.

Дисперсія може бути обчислена за допомогою рішення рівняння переносу на стадії розрахунку горіння. Такий підхід є прийнятним в плані використання обчислювальних засобів і не придатним для заключного трактування результатів прогнозування викидів NO_x. Для розрахунку дисперсії використовується спосіб розрахунку заснований на апроксимуванні форми рівняння переносу для дисперсії.

Концентрації NO_x, які генеруються у пристроях горіння, як правило, низькі. У результаті цього хімічні процеси окислення азоту оказують зневажливо малий вплив на поля швидкостей, температур, концентрації головних продуктів горіння.

2.4 Висновки

1. Результати теоретичних досліджень, наведені вище, дозволяють оцінити можливості зниження утворення оксидів азоту за рахунок зміни технологічних параметрів процесу горіння і конструктивних характеристик топково пальникових пристроїв.

2. Внаслідок високої енергії активації реакцій термічного утворення NO, зниження максимальних температур в зоні горіння буде знижувати утворення монооксиду азоту. У струминних факелах попередньо не перемішаної суміші випромінювання від факела, яке знижує максимальну температуру, оказує сильний вплив на утворення NO. Тому зниження теплонапруги зони активного горіння за рахунок збільшення геометричних розмірів перерізу камери згоряння, збільшення числа працюючих ярусів горілок і відстані між ярусами, а також

більш вільне розміщення пальникових пристроїв і вибір їх компонування, зниження температури підігріву повітря на горіння, введення інертних димових газів рециркуляції і води є можливими шляхами скорочення викидів оксидів азоту. Ефект рециркуляції димових газів полягає в розведенні повітря інертними продуктами, в результаті максимальна температура горіння знижується, а отже, зменшується швидкість утворення NO.

3. Використання технології ступеневої спалювання, коли на першій стадії для організації процесу горіння створюються умови типові для багатої суміші, щоб утворювалося мінімальна кількість з'єднань типу $NO_X + HCN + NH_3$.

Потім створюються умови збагачення суміші повітрям для отримання стехіометричних або близьких до них умов горіння. На першій стадії утворення оксидів азоту утруднено через відсутність вільного кисню, а на другий-внаслідок більш низького рівня температур у факелі і високого вмісту інертних продуктів згоряння. Ступенева спалювання знижує утворення як термічних, так і паливних оксидів азоту, що дуже важливо при спалюванні, які містять у своїй горючій масі азот. Потім можна використовувати третю стадію горіння, здійснивши введення додаткового палива, і зменшити зміст NO за рахунок реакцій $NO + CH \rightarrow$ продукти.

4. Чим більше час перебування суміші в процесі горіння в зоні високих температур, тим ближче система до досягнення рівноважної концентрації NO. Час повинен бути таким, щоб все паливо було окислено, а утворення проміжних компонентів CO і NO було перервано швидким охолодженням.

5. Низький вихід NO_x можна досягти при спалюванні збіднених сумішей з високим коефіцієнтом надлишку повітря. При збільшенні коефіцієнта надлишку повітря суміші температура полум'я знижується і утворення оксидів азоту зменшується. Однак зменшується і швидкість перетворення CO в CO_2. Таким чином, існує верхня межа для величини коефіцієнта надлишку повітря, коли утворюється концентрація.

РОЗДІЛ 3
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СКЛАДУ ПРОДУКТІВ ЗГОРАННЯ

3.1 Порівняння газових антропогенних викидів

Проведені експерименти дозволили встановити типові тренди основних газових антропогенних викидів протягом горіння навішування палива. На рис. 3.1 представлені концентрації оксидів, вуглецю, сірки та азоту. Результати наведені для умов спалювання групи палив: вугільного пилу, ВВП, ОВВП з використанням мазуту та відпрацьованого турбінного масла.

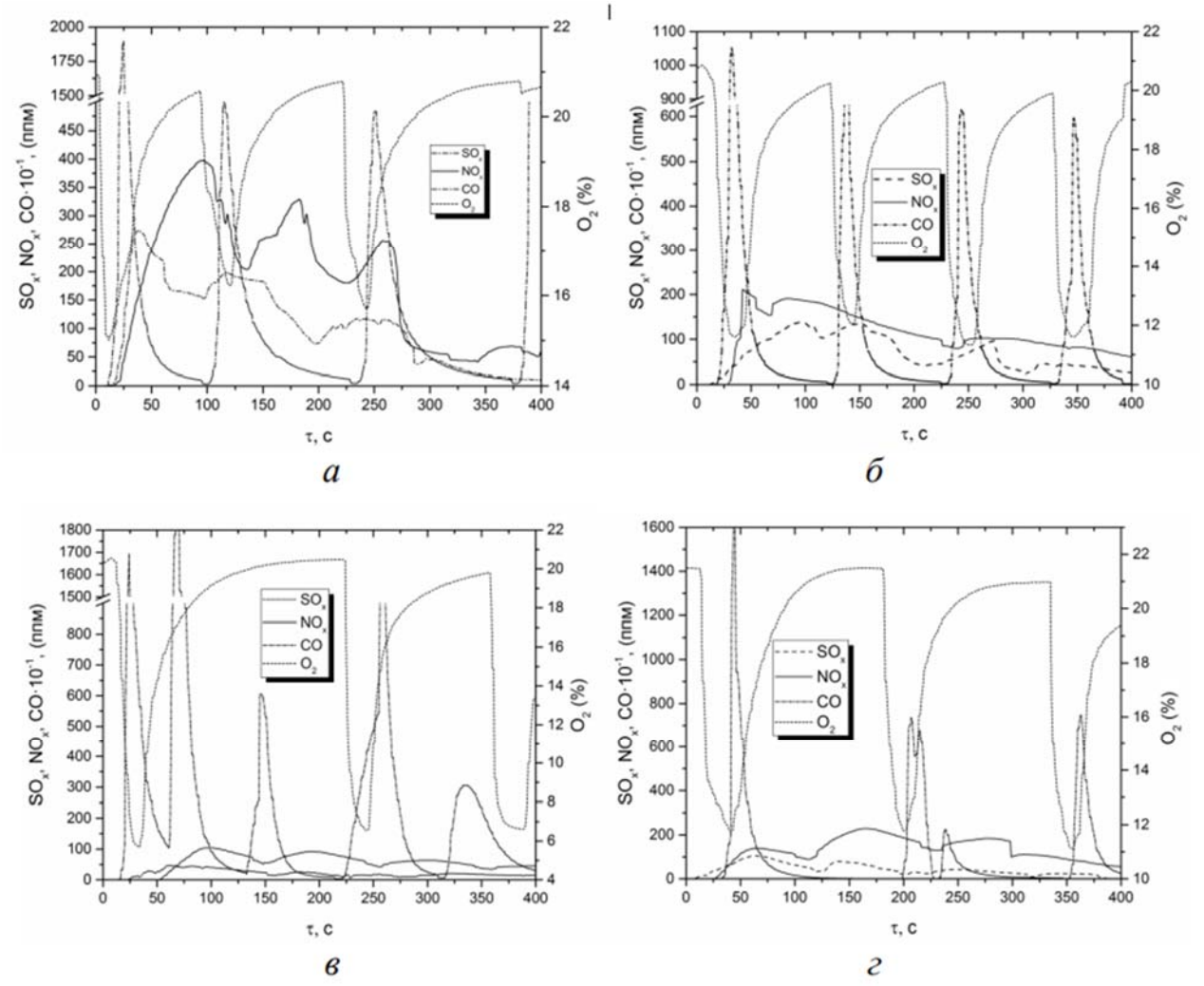


Рисунок 3.1 – Тренди основних газоподібних викидів спалювання вугільного пилу (а), ВВП (б) та ОВВП на основі мазуту (в) та турбінної олії (г) при температурі в камері згоряння 800 °С

Отримані тренди ілюструють суттєві відмінності як концентрацій аналізованих викидів, а й тривалостей збереження високих значень цих концентрацій. Коливальний характер кривих пояснюється специфічними особливостями роботи газоаналізатора. Зростання та досягнення пікового значення відповідає моменту обробки забраної аналізованої проби газу, падіння концентрацій – моменту (забору) подачі димового газу до сенсорів газоаналізатора. Вигляд кривих характеризує відповідні затримки запалення і тривалості процесів горіння. Для водовугільної суспензії можна відзначити максимальну затримку в часі, що ілюструє відповідну інерційність прогріву ВВП. Цей результат досить очевидний та обумовлений впливом ендотермічних фазових перетворень води при нагріванні ВВП. Для суспензій ОВВП (з мазутом та відпрацьованим турбінним маслом) можна відзначити меншу інерційність (раніше починається інтенсивне виділення газоподібних продуктів термічного розкладання та окислення).

Також можна виділити більш тривале виділення продуктів згоряння композицій ОВВП в порівнянні з суспензією ВВП. Це пов'язано з великим вмістом горючих компонентів у складі ОВВП (за рахунок додавання горючих рідин). Для вугільного пилу добре видно мінімальну інерційність процесу запалювання (рис. 3.1).

Обчислення середніх концентрацій проводилося за допомогою методу прямокутників. Площа під кривою розбивалася на безліч прямокутників, ширина яких відповідала тимчасовому інтервалу. Далі обчислювався добуток ширини і довжини для кожного прямокутника, після чого шляхом складання всіх утворень визначалася сумарна площа під кривою тренда газоподібного викиду, що розглядалася. Середнє значення розраховувалося як ставлення знайденої площі до всього інтервалу часу, протягом якого реєструвалася концентрація конкретного газового викиду.

3.1.1 Порівняння антропогенних викидів при спалюванні вугілля та продуктів вуглезбагачення

На рис. 3.2 представлені залежності концентрацій NO_x від температури в камері при спалюванні вугілля різних марок та продуктів вуглезбагачення. Встановлено, що зі зростанням температури концентрації NO_x при спалюванні всіх марок вугілля, продуктів вуглезбагачення збільшуються. Цей результат можна вважати досить очевидним, але зміни концентрацій для різних твердих паливних компонентів ОВВП суттєво відрізняються.

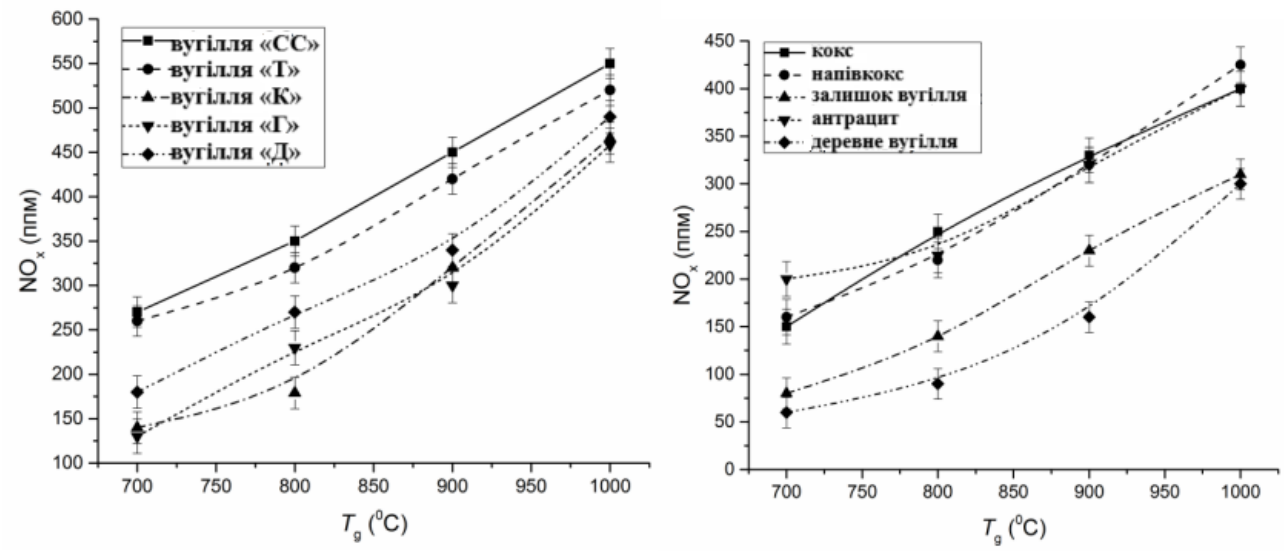


Рисунок 3.2 – Залежності концентрацій NO_x від температури в камері згоряння при спалюванні вугілля різних марок, а також продуктів переробки

Оксиди азоту при горінні палив можуть утворюватися з молекулярного азоту повітря та азотовмісних компонентів палива. При спалюванні вугілля утворюються термічні та паливні NO_x. У ході експериментів встановлено, що визначальний вплив на вихід NO_x має тепловий ефект у зоні горіння. Утворення термічних оксидів азоту відбувається за високотемпературним механізмом окиснення азоту в зоні горіння при досягненні високих температур.

На характеристики процесу переходу паливного азоту в оксиди при горінні пилу різного вугілля також впливає температура спалювання. Паливні NO_x починають утворюватися в пилегазовому потоці при температурах у камері

згоряння 600 °С і вище, коли забезпечується стійке запалювання та подальше горіння летких. Встановлено зв'язок між концентраціями NO_x, що утворюються в процесі горіння, та вмістом у вихідному паливі азоту та вологи, що сприяє зниженню виходу NO_x. Найбільшим вмістом азоту та практично рівним вмістом вологи характеризуються вугілля марок «СС» та «Т». Найменші викиди NO_x характерні для вугілля марки «Д» з високим вмістом вологи (5,17%), що обумовлює нижнє розташування кривої. Для коксу, напівкоксу та антрациту зареєстровані високі значеннями викидків оксидів азоту: 150–400 ппм, 160–420 ппм та 200–400 ппм, відповідно, найменшими концентраціями характеризуються вуглецевий залишок піролізу автомобільних шин (40–300 ппм) та древесне вугілля (25–280 ппм).

3.1.2 Порівняння антропогенних викидів під час спалювання ВВП

На рис. 3.3 представлені концентрації основних газоподібних. антропогенних викидів від температури у камері згоряння для водовмісних палив на основі кам'яного вугілля різних марок «СС», «Т», «К», «Г», «Д» і відходів вуглезбагачення аналогічних марок.

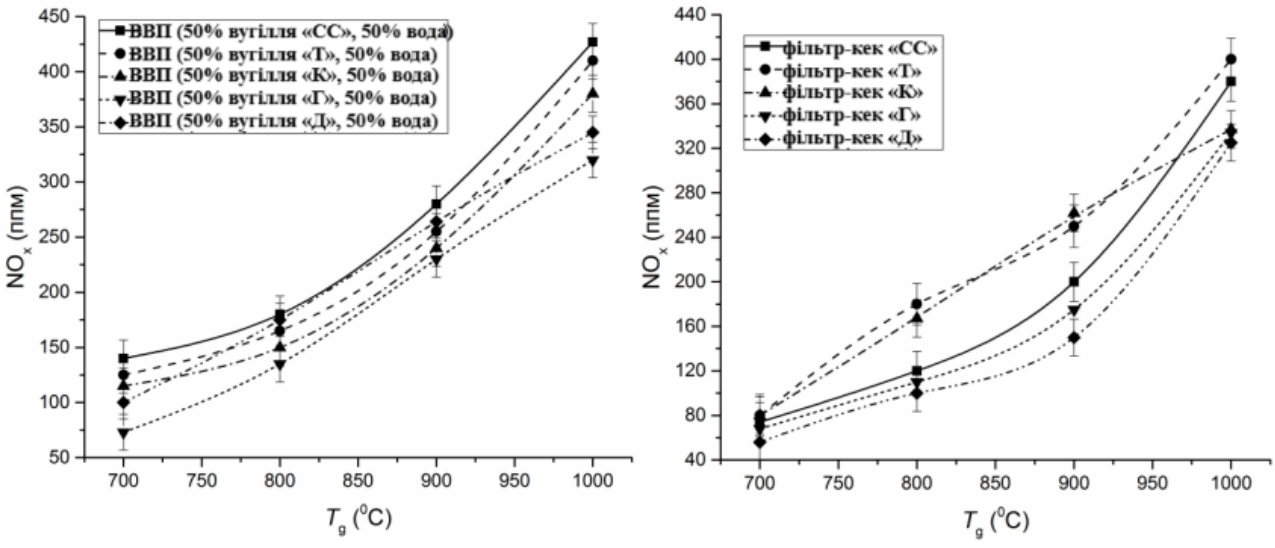


Рисунок 3.3 – Залежності концентрацій NO_x від температури в камері згоряння при спалюванні ВВП на основі кам'яного вугілля і відходів вуглезбагачення (фільтр-кеків)

Порівняльний аналіз даних щодо концентрацій викидів дозволив зробити висновок про те, що в порівнянні з традиційним спалюванням пиловугільного палива застосування ВВП на основі вугілля веде до зниження NO_x на 25-57%.

Застосовуючи ВВП на основі фільтр-кеку, можна досягти зменшення NO_x на 23-75%. Присутність водної фази у складі суспензії є головною причиною зниження викидів оксидів азоту, а також недопалу. Наявність останньої у вигляді перегрітої пари в зоні горіння сприяють більш тонкому розпорошенню вуглецевої основи за рахунок мікровибухів суспензійних крапель. За рахунок більш повного її вигоряння знижується кількість сажі, бензапірену і вторинних вуглеводнів у газах, що відходять.

З цієї причини відбувається зниження концентрацій твердих частинок мікронних фракцій, оксидів сірки азоту.

Завдяки присутності води у ВВП та ОВВП температура та швидкість адіабатичного горіння знижується, що призводить до зменшення NO_x.

Зниження викидів NO_x при спалюванні ВВП, ОВВП та фільтр-кеків обумовлено відповідними хімічними реакціями, які протікають при горінні палива, в яких бере участь вода (у вигляді водяної пари) як несуче середовище суспензій. У процесі термічної дисоціації (розкладання речовини за високих температур) води звільняються вільні молекули кисню і водню.

Кисень, що утворюється в ході реакції, інтенсифікує горіння, а водень і монооксид вуглецю виступають як відновники, сприяючи зниженню вмісту оксидів азоту та сірки в димових газах.

Аналіз результатів експериментів показав, що з погляду викидів NO_x спалювання фільтр-кеків має великий екологічний потенціал. В області температур спалювання 700–900 °С концентрації оксидів азоту лежать у діапазоні 50–275 ппм, для ВВП на основі цього вугілля діапазон становить 50-375 ппм. Такий результат обумовлений нижчими значеннями характерних температур у зоні горіння, а також теплотворної здатності вологих фільтр-кеків порівняно із суспензіями на основі кам'яновугільного пилу. При температурі в камері згоряння вище 950 °С різниця в концентраціях NO_x знижується, значення

стають порівнянними. Так, наприклад, фільтр-кек «Т» має високий вміст азоту (2,31%) та відносно низьку вологість (39,1%). Тому відповідні високі концентрації викидів NO_x. Для фільтр-кеків «Г» і «Д» характерно низький вміст азоту (0,02%). Отже, ці палива мають менші викиди NO_x. Концентрації оксидів азоту, що утворюються при горінні водовугільних суспензій також пропорційні вмісту азоту у вугіллі, з якого вони виготовлені.

Порівняння основних екологічних характеристик дозволяє стверджувати, що з точки зору концентрацій NO_x немає істотної різниці між водомісткими паливними суспензіями, приготованими з вугілля або відходів їх переробки та збагачення. Обидва типи суспензій здатні суттєво підвищити екологічні показники спалювання вугілля на ТЕС. Однак у рамках досліджень основну увагу приділено можливості залучення відходів у складі водовугільних суспензій (зокрема вуглепереробки) у процесі генерації енергії. Отримані результати наголошують на великих екологічних перспективах широкого застосування відходів вуглепереробки в теплоенергетиці. З цих причин як основний вугільний компонент у більшій частині досліджень було обрано найбільш типові відходи вуглезбагачення (фільтр-кекі, шлами, промпродукт).

3.1.3 Порівняння газових антропогенних викидів під час спалювання ОВВП

Використання відходів переробки нафти у складі паливних суспензій становить значний інтерес. Це зумовлено тим, що відпрацьовані масла, мазут, водонафтові емульсії та багато інших нафтопродуктів характеризуються високою теплотою згоряння (як правило, від 37 до 45 МДж/кг). Їх додавання до суспензії навіть на основі енергетичного вугілля низького ступеня метаморфізму призведе до достатньо суттєвого зростання теплотворної здатності та температури горіння отриманої паливної суміші. Це є основним фактором, що обґрунтовує використання нафтопродуктів у складах ОВВП на основі відходів (наприклад, флотаційних вугільних кеків). Також при використанні в подібних паливних композиціях рідкого пального компонента з досить низькими

температурами спалаху, запалення та теплотою випаровування (наприклад, відпрацьованої турбінної або трансформаторної олії) знижуються час ініціювання та мінімальні температури стійкого запалення. Крім цього, нафтопродукт у складі палива виконує функцію стабілізатора (перешкоджає швидкому розшаровуванню суспензії на тверду та рідку фази).

Для приготування органоводовуглецевих палив на основі фільтр кеків використовувалися два рідких горючих компоненти, найбільш поширених і які суттєво впливають на властивості суспензій: мазут та відпрацьоване турбінне масло. Отримані експериментальні дані (рис. 3.4) дозволяють зробити висновок, що додавання в суспензії ВВП рідкого пального компонента може сприяти зростанню концентрацій антропогенних викидів у середньому на 20–60 % порівняно з ТВП.

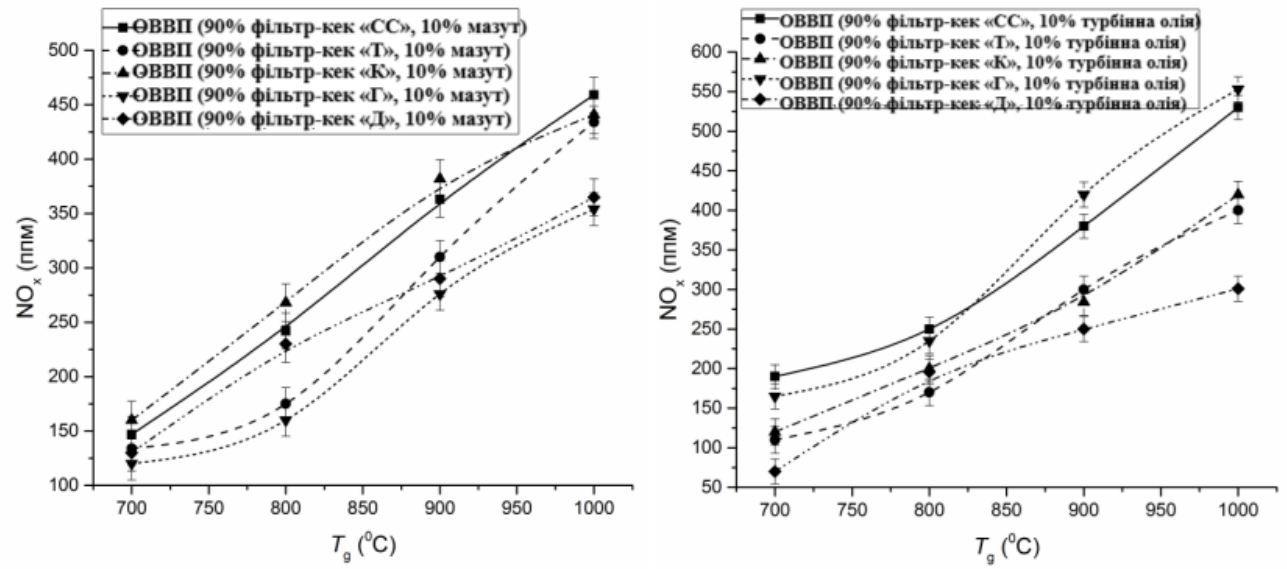


Рисунок 3.4 – Залежності концентрацій NO_x від температури в камері згоряння при спалюванні ОВВП на основі різних видів фільтр-кеків з додаванням мазуту та відпрацьованої турбінної олії

Але якщо проводити порівняння з вугіллям, то погіршення екологічних характеристик за рахунок додавання відпрацьованих олій чи мазуту не є масштабним. З погляду оксидів сірки, всі розглянуті склади ОВВП знижують SO_x на 15–70 %. Зменшення NO_x не настільки очевидне у разі спалювання ОВВП,

проте для деяких сортів вугілля суспензії ОВВП екологічно перспективніше (ніж вугілля або кеки в традиційному вигляді) і дозволяють знизити NO_x на 7-30%.

Екологічний внесок використовуваних горючих рідин обумовлений їх хімічним складом, оскільки вони мають високі концентрації сполук сірки та азоту. Однак наявність 10% турбінної олії або мазуту у складі ОВВП призводить до зменшення часів затримки запалення коксового залишку за рахунок прогріву від газофазного горіння не лише продуктів розкладання частинок вугілля, а й парів горючої рідини, а також зниження температури запалення на 20–50 °С. Як наслідок, можна за рахунок зниження температури компенсувати можливе зростання концентрацій викидів NO_x. До того ж, додавання рідкого пального компонента призведе до невеликого зростання температури в зоні горіння, що може істотно впливати на характеристики зольного залишку.

Порівнюючи результати, отримані при спалюванні ОВВП з різними горючими рідинами, можна дійти невтішного висновку в тому, що з додаванням мазуту концентрації трохи вище, але це різниця становить 10–60 ппм.

Вибір тієї чи іншої рідкої паливної складової для ОВВП обумовлений переважно характеристиками процесу горіння: температурою запалювання, теплотою згоряння, інерційністю запалення та стабільністю суспензій, а також вартістю та обсягами (запасами) сировини для приготування.

3.2 Вплив концентрації компонентів

3.2.1 Твердий горючий компонент

Вивчено вплив на NO_x та SO_x концентрації вугільного компонента у складі ОВУТ (рис. 3.5). Використані склади: суспензії ОВВП, виготовлені на основі кам'яного вугілля марки «Д» та бурого вугілля марки «2Б». Як рідкий горючий компонент ОВВП застосовувався мазут, концентрація якого залишалася постійною і складала 10%. Концентрація вугілля експериментах варіювалася від 40 до 60 %. Експерименти проводилися за постійною температурою (800 °С) в камері згоряння. Отримані експериментальні залежності (рис. 3.5) показують, що

збільшення вмісту вугілля паливної композиції веде до значного зростання концентрацій SO_x і NO_x.

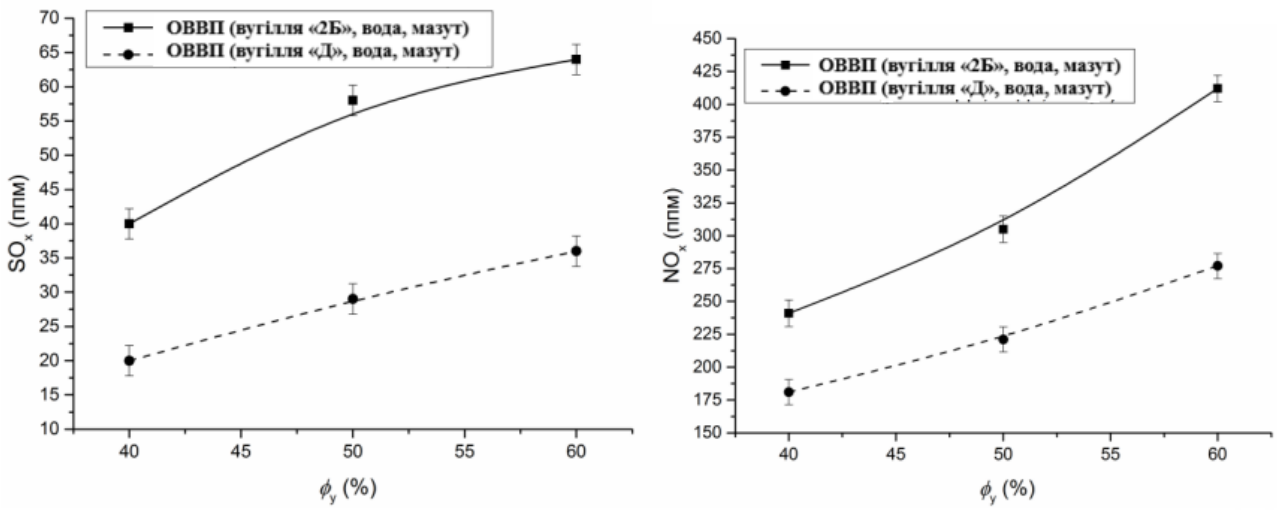


Рисунок 3.5 – Залежності концентрацій SO_x і NO_x від вмісту вугілля у суспензіях ОВВП на основі мазуту (10 %) при температурі в камері згоряння 800 °С

Порівняльний аналіз отриманих результатів показав, що концентрації викидів від спалювання ОВВП на основі кам'яного вугілля набагато нижче (наприклад, SO_x на 50%, NO_x на 30%), ніж для ОВВП на основі бурого вугілля. Значення максимальних концентрацій викидів при спалюванні ОВВП із вмістом вугілля 60 % близькі до відповідних значень викидів забруднюючих речовин при спалюванні вугілля. Підвищення концентрації вугільного пилу призводить до зміни в'язкості суміші, теплопровідності та особливо теплоти згоряння.

Як наслідок, зменшується час інертного прогріву зразка ОВВП та зростає швидкість перебігу стадій запалення, горіння, відбувається прискорення реакції окислення паливних сірки та азоту. Підвищення масової частки високоякісного вугілля призводить до зростання концентрації летких у малій околиці краплі ОВВП, що веде до зростання концентрацій оксидів азоту, тому що їх активне формування починається на стадії вигоряння летючих.

Слід зазначити, що варіювання концентрації вугілля у складі паливних композицій головним чином впливає теплоту згоряння останніх. Тому порогові (мінімальні) значення концентрацій вугілля у складі суспензій ВВП чи ОВВП залежить від необхідної теплоти згоряння палива.

Вклад усіх компонентів суспензій ВВП та ОВВП у сумарну теплоту згоряння є адитивною. Як наслідок, теплота згоряння може змінюватися від мінімальних (6-8 МДж/кг) до максимальних (14-20 МДж/кг) значень. Також концентрація вугілля у ВВП та ОВВП істотно впливає на вартість паливних суспензій. Остання може зрости на 15–30% у разі зростання концентрації вугілля різних марок від 40 % до 60 %.

3.2.2 Вода

Дослідження щодо визначення впливу концентрації води на склад продуктів згоряння органоводовугільного палива проведено для суспензій ОВВП, приготованих на основі вугілля марок «Д» та «2Б». Концентрація води варіювалася від 30 до 50%, концентрація мазуту залишалася рівною 10% (рис. 3.6).

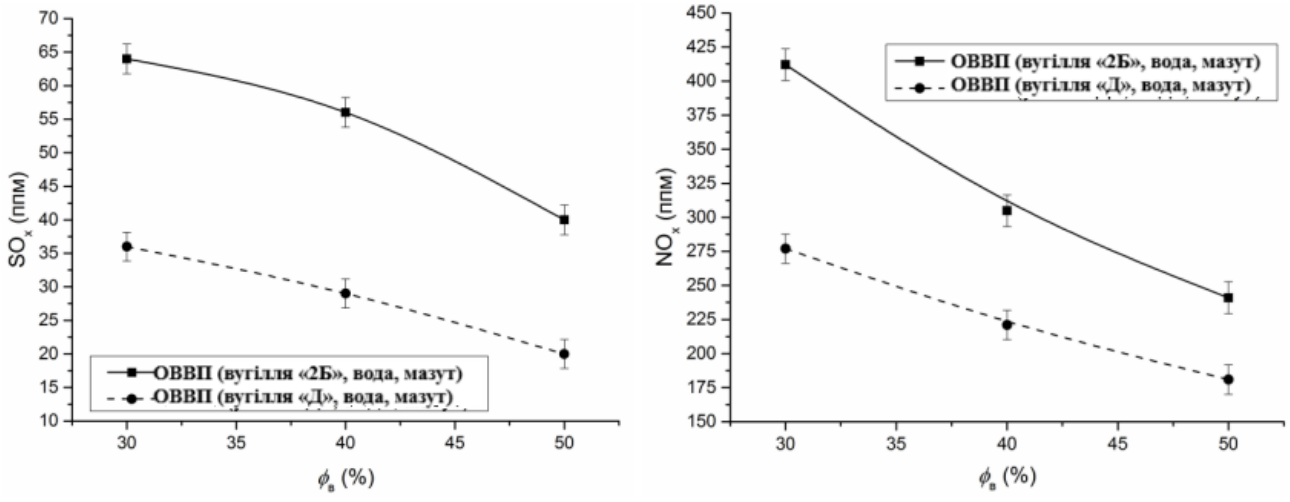


Рисунок 3.6 – Залежності концентрацій SO_x та NO_x від вмісту води ($\varphi_в$) у суспензіях ОВВП на основі мазуту (10 %) при температурі в камері згоряння 800 °С

Збільшення частки води у складі суспензій сприяло зниженню концентрацій основних антропогенних викидів на 25–55 %. Зростання концентрації води у складі ОВВП призводить до суттєвого зниження максимальної температури горіння. Це зумовлено значним витрачанням енергії на ендотермічний фазовий перехід при пароутворенні (близько 2 МДж/кг). З цієї причини істотно зростає інерційність прогріву і запалення ОВВП.

Найменші температури є причиною зниження концентрацій SO_x та NO_x. При горінні ОВВП вода, що входить до складу палива (30–50 %), виступає у ролі окислювача, що прискорює процес вигоряння вугілля у складі суспензії. Це обумовлено термохімічною взаємодією вуглецю коксу з водяними парами, в результаті якого утворюються низькореакційні комплекси, що прискорюють запалення вуглецевого залишку. Збільшення частки води підвищує економічну ефективність енергоустановок шляхом зниження недопалу, а також внаслідок зменшення забруднення робочих поверхонь нагріву у котлоагрегатах ТЕС.

3.2.3 Рідкий горючий компонент

В рамках досліджень вивчено роль рідкого пального компонента ОВВП з погляду екологічних наслідків їх спалювання. Проведено експерименти (рис. 3.7) зі спалювання ОВВП на основі бурого (марка «2Б») та кам'яного (марка «Д») вугілля при варіюванні концентрації відпрацьованої турбінної олії в межах 0–15 %.

Встановлено, що із збільшенням частки рідкої паливної складовою (відпрацьованої турбінної олії) в суспензії зростають концентрації викидів SO_x і NO_x. Збільшення SO_x обумовлено зростанням загального сірковмісту всієї суміші за рахунок підвищення частки горючої рідини. Чим більше частка масла, що спалюється, в суспензії, тим більше сумарні викиди SO_x. Зареєстровано зростання концентрацій діоксиду сірки в межах 25-55%. Присутність рідкої горючої складової сприяє збільшенню летких компонентів у процесі горіння, що призводить до підвищення температури горіння. Отже відбувається повніше вигоряння твердої основи палива. У процес нагрівання рідкої паливної складової

відбувається утворення її пари, присутність яких сприяє формуванню оксидів азоту. Слід зазначити, що значного збільшення NO_x не реєструвалося, діапазон зміни становив 11–16 %. Зіставляючи отримані результати з даними для кам'яного вугілля марки «Д», можна зробити висновок про те, що при спалюванні ОВВП із вмістом олії в діапазоні 5–15 % концентрації газів не перевищують значення викидів при спалюванні вугілля. Подальше збільшення частки олії в ОВВП призведе до перевищення значень викидів речовин, що розглядаються над значеннями для вугілля.

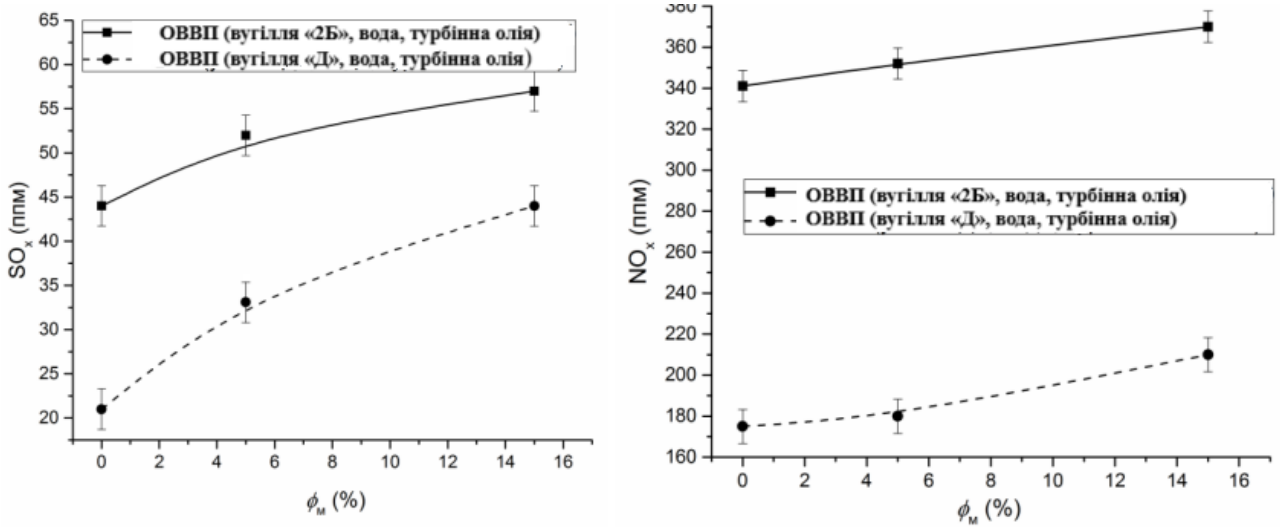


Рисунок 3.7 – Залежності концентрацій SO_x та NO_x від вмісту відпрацьованого турбінного масла ($\varphi_м$) у суспензіях ОВВП на основі вугілля марки «Д» та «2Б» при температурі в камері згоряння 800 °С

Оскільки більшість горючих і легкозаймистих рідин навіть після експлуатації (наприклад, відпрацьовані індустріальні олії) мають теплоту згоряння в 1,5–2,5 рази більше вугілля, то додавання навіть 10–15 % таких рідин до складу ВВП призводить до суттєвого зростання теплоти згоряння. Наприклад, при додаванні 10% відпрацьованої турбінної олії теплота згоряння суспензій ВВП на основі бурого вугілля зростає на 18–24%.

Таке збільшення можна вважати значним у масштабах не лише малих котелень, а й великих теплових електростанцій. Цей ефект стає особливо

значущим, якщо врахувати, що вартість відпрацьованих індустріальних масел або різних інших використаних горючих рідин визначається в основному витратами на їх збирання, зберігання та транспортування. Тому встановлене зростання концентрацій антропогенних викидів при додаванні до ВВП різних відпрацьованих олій та інших горючих рідин складно вважати значним обмеженням розвитку технологій ОВВП.

3.3 Потенційні покращення енергетичних характеристик котлів ТЕС при спалюванні ОВВП та ВВП замість вугілля

Визначено концентрації CO, CO_2, NO_x та SO_x при спалюванні кеків типових марок кам'яного вугілля. Частка сухої речовини в кеках становила від 39 до 57% (табл. 3.1). Розміри твердих частинок кеків становили 100-150 мкм.

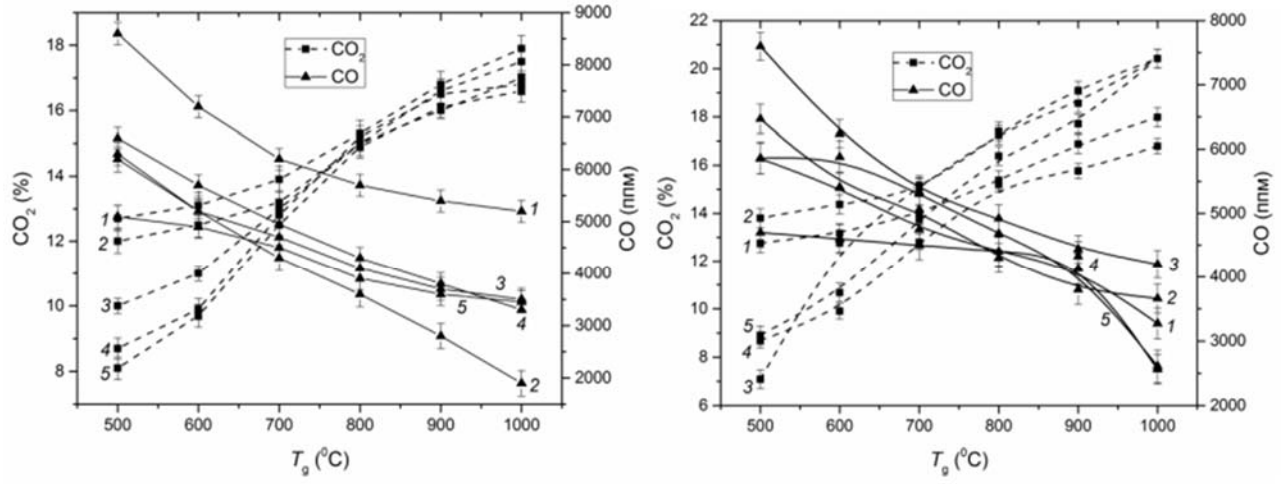
Зволожені кеки по суті представляють суспензії ВВП (оскільки у ВВП, як правило, концентрація вугілля становить від 40 до 60 %). Як наслідок, проводилося перемішування кеку з додаванням пластифікатора (відн. мас. концентрація 1%).

Встановлено, що критерієм збереження стабільних властивостей ОВВП найбільш раціональним рідким горючим компонентом суспензії є мазут. Досліджено процеси та результати спалювання двох груп суспензій: перша – фільтр–кек 99 %, пластифікатор 1 %; друга – фільтр-кек 89%, мазут 10%, пластифікатор 1%. Маса спалювання навішування палива у всіх експериментах становила 1 грам.

Таблиця 3.1 – Результати технічного аналізу кеків

Зразок	Вологість, %	Зольність, %	Вміст летких, %	Теплота згорання, МДж/кг
Фільтр-кек «Д»	56,8	36,99	41,47	19,26
Фільтр-кек «Г»	53,0	33,82	43,11	22,17
Фільтр-кек «К»	43,5	26,46	23,08	24,83
Фільтр-кек «Т»	37,9	50,89	30,16	15,23
Фільтр-кек «СС»	39,1	21,20	16,09	26,92

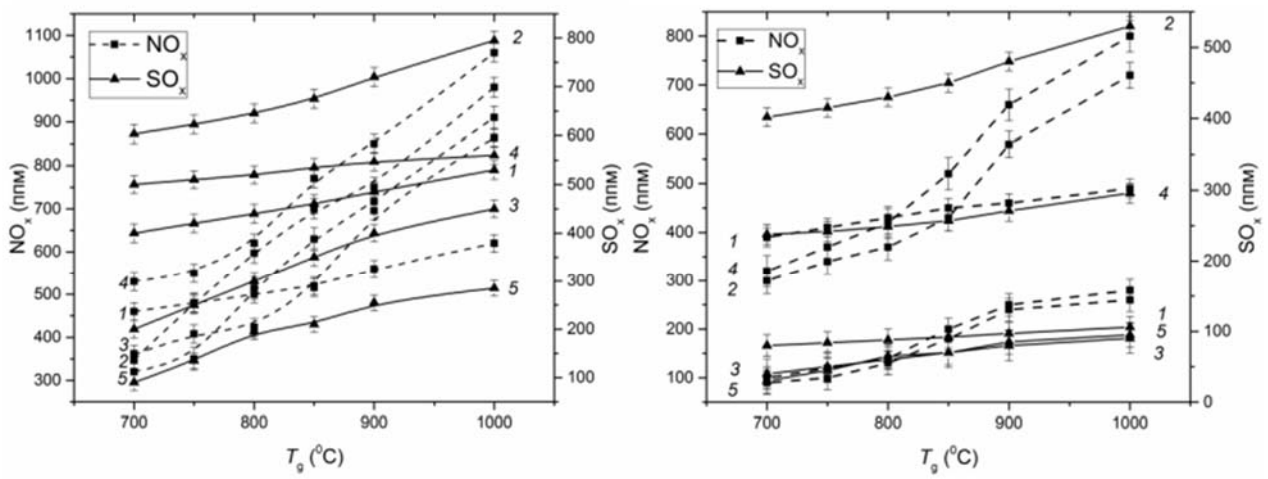
На рис. 3.8 добре видно, що зі зростанням температури спалювання концентрації CO_2 для всіх досліджених кеків стають практично ідентичними (при Tg>900 °C відносні відхилення кривих між собою перевищують 5 %). При цьому значення CO_2 виходять на деякі постійні значення 16–18 %. Це говорить про те, що різні властивості вугільних компонентів практично не впливають на викиди парникового основного газу CO_2 при високих температурах горіння. При високотемпературному спалюванні ОВВП характеристики екологічного впливу всіх типів кеків відрізняються незначно.



1 – фільтр-кек «Т»; 2 – фільтр-кек «К»; 3 - фільтр-кек «Г»; 4 - фільтр-кек «СС»; 5 – фільтр-кек «Д»

Рисунок 3.8 – Залежності максимальних концентрацій CO та CO_2 від температури при спалюванні кеків (а) та ОВВП (фільтр-кек у вихідному желейному стані та 10 % мазуту) (б)

На рис. 3.8 можна відзначити три характерні ділянки: 500–750 °C, 750–850 °C, 850–1000 °C. На всіх залежностях CO_2 у діапазоні температур 750–850 °C добре видно точку перегину. До цієї точки концентрації CO_2 нелінійно зростають (500-750 °C), а після (850-1000 °C) переходять до стадії насичення. Аналогічні висновки щодо перегину кривих можна зробити для CO.



1 – фільтр-кек «Т»; 2 - фільтр-кек «К»; 3 - фільтр-кек «Г»; 4 - фільтр-кек «СС»; 5 – фільтр-кек «Д»

Рисунок 3.9 – Залежності максимальних концентрацій SO_x та NO_x від температури при спалюванні кеків (а) та ОВВП (кек у вихідному желейному стані та 10 % мазуту) (б)

Результати дослідів показали, що всі досліджені кекі стійко запалюються при температурах камери згоряння вище 500 °С. Тому всі температури на рис. 3.8 можна вважати температурами істотно вище мінімально можливих температур спалювання. Можна зробити висновок у тому, що з зменшення викидів CO_2 доцільно зниження температури Tg. Але відомо, що останнє може призвести до суттєвого недопалу палива та зниження сумарної теплоти згоряння.

Як наслідок, при виборі параметрів технологічного процесу спалювання важливим є компроміс між екологічними, енергетичними та економічними вимогами.

Виходячи з експериментальних значень часів затримки запалення та повного згоряння кеків та ОВВП, приготованих на основі цих кеків, можна зробити обґрунтований висновок про те, що зниження температури спалювання з 900 до 800 °С призводить до незначного зростання інерційності запалення та тривалості процесу горіння. При цьому характерний недопал палива змінюється лише на 2–3 %. Таке зниження температури спалювання не призведе до суттєвої

зміни енергетичних показників, але при цьому викиди CO_2 зменшяться на 30–40 %.

Для умов щодо низьких температур спалювання (до точок перегину на рис. 3.8) властивості кеків відіграють істотну роль при визначенні концентрації CO_2, а також інших шкідливих викидів. Зокрема, встановлено (рис. 3.9), що відходи вуглепереробки з малою вологістю та вмістом летких призводять до зростання NO_x та SO_x.

Цей результат дозволяє зробити висновок, що для кеків, які містять більше органічної частини вуглецевого залишку, особливо важливий низькотемпературний режим спалювання, тобто. усунення температури горіння в область до точки перегину. У разі великого вмісту летких (наприклад, для кека «Г») температури спалювання можна дещо підвищувати щодо інших кеків, оскільки цей фактор не істотно змінить обсяги CO і CO_2.

При аналізі концентрацій викидів (рис. 3.8, 3.9) можна зробити висновок про те, що основна перевага ВВП та ОВВП полягає в тому, що знижуються (у кілька разів) викиди оксидів сірки та азоту. Водночас із рис. 3.9 можна зробити висновок про те, що концентрації NO_x і SO_x для ВВП (на прикладі кеків) менше, ніж ОВВП. Це обумовлено тим, що при додаванні до складу паливної суспензії рідкого пального компонента (наприклад, мазуту або турбінного масла) навіть у невеликій кількості (10% відносної масової концентрації) зростає частка пального в паливній суміші. Як наслідок, зростання концентрацій викидів для ОВВП порівняно з ВВП неминуче.

Додавання рідких горючих компонентів призводить до зниження температури запалення (мінімальної необхідної температури окислювача) на 40-70 °C. Як наслідок, можна за рахунок зниження температури компенсувати можливе зростання концентрацій викидів CO, CO_2, NO_x та SO_x внаслідок додавання рідких горючих компонентів до складу ОВВП. До того ж додавання рідкого пального компонента призведе до невеликого зростання температури у зоні горіння. Тому при використання суспензій ОВВП можливе суттєве зниження температури спалювання з метою підвищення екологічних показників

роботи котлів ТЕС. Для ВВП мінімальні температури запалення можуть бути нижчими на 20–50 °С, ніж для вугільного пилу.

Це зумовлено ефектами закипання води та відповідними мікровибухами у порах крапель паливних суспензій. Як наслідок, можна зробити висновок про те, що і для ВВП та ОВВП можливе зниження температур спалювання в порівнянні з пилоподібним спалюванням вугілля.

У разі ОВВП розкид експериментальних точок в одній серії дослідів за ідентичних умов значно ширше, ніж для дослідів з ВВП (на основі кеків). Як наслідок, апроксимаційні значення на рис. 3.8 не завжди відображають монотонне зростання або зниження відповідних концентрацій. Це пов'язано з тим, що рідкий горючий компонент значно нерівномірно прогрівається, випаровується і горить у складі ОВВП. Тим не менш, загальна тенденція (в експериментах із застосуванням мазуту та відпрацьованого турбінного масла) зростання концентрацій викидів навіть при невеликому додаванні відпрацьованих рідких горючих компонентів простежувалася у всіх дослідах. За рахунок варіювання температури в камері згоряння можна суттєво змінювати не лише концентрації антропогенних викидів, а й забезпечувати прийнятні енергетичні характеристики. При цьому, чим менший вміст летких компонентів у фільтр-кеках, тим стабільнішими є енергетичні параметри.

Якщо судити за результатами експериментів, то для фільтр-кеків марок «К» і «Т» краще використовувати обговорюваний підхід для поліпшення екологічної обстановки поблизу ТЕС.

Важливо відзначити основні переваги зниження температури камери згоряння для поліпшення екологічної обстановки. По-перше, при зниженні температури Tg істотно зменшується теплова напруга на всіх елементах конструкцій котла і, як наслідок, збільшується термін служби (їх експлуатації). По-друге, при використанні фільтр-кеків, а також суспензій ВВП та ОВВП температура в камері згоряння знижується в порівнянні зі спалюванням вугілля в пилоподібному стані, так як у складі суспензій міститься вода (енергія витрачається на її випаровування).

Це призводить до того, що зміна температури в камері згоряння стає плавною і монотонною протягом процесу горіння палива. Виключаються стрибки температури, що призводить до збільшення паркового ресурсу (і терміну експлуатації) теплонавантаженого обладнання котлів ТЕС. По-третє, зниження температури в котлі може призвести до істотного зменшення електричної та теплової енергії, що виробляється. Аналіз показав, що використання технологій, заснованих на суспензіях ВВП та ОВВП, дозволяє мінімізувати такі проблеми.

У разі застосування суспензій ВВП та ОВВП, а також зниження температури в камері згоряння внаслідок мінімального вмісту летючої золи та небезпечних оксидів на поверхні водяних екранів не утворюється буферний шар. Тепловий потік не знижується та зберігається досить високим протягом тривалого періоду експлуатації. До того ж, труби не піддаються небезпечному високому термічному навантаженню. Як наслідок, вони довше експлуатуються, немає необхідності їх очищувати та зупиняти роботу котельного агрегату ТЕС.

3.4 Висновки

1. Визначено основні фактори, що мають значний вплив на процеси формування основних антропогенних викидів при спалюванні вугільного палива. До них відносяться температура газоповітряного середовища, сіро- і азотовмістні палива, кількість летких і вологість палива. Виділено типові відмінності в концентраціях SO_x та NO_x, що утворюються при горінні вугілля різного ступеня метаморфізму, а також продуктів їх переробки.

2. Присутність води (несучої фази суспензії) є визначальним фактором у суттєвому зниженні концентрацій оксидів сірки та азоту при спалюванні ВВП та ОВВП. Горіння водовмісних суспензій супроводжується характерними хімічними реакціями, у яких бере участь вода (у вигляді водяної пари), сприяючи зниженню вмісту оксидів азоту та сірки в димових газах.

3. Порівняння основних екологічних характеристик показало, що з точки зору концентрацій SO_x та NO_x немає істотної різниці між водовугільним паливом,

приготованим з вугілля або відходів їх переробки. Обидва типи суспензій здатні суттєво підвищити екологічні характеристики спалювання палива на вугільних ТЕС.

4. Додавання рідкої паливної компоненти призводить до зростання концентрацій антропогенних викидів у середньому на 20–60 % порівняно з ТВВ. Але якщо проводити порівняння з вугіллям, то погіршення екологічних характеристик за рахунок додавання відпрацьованих олій чи мазуту не є масштабним (не більше 10–15%).

5. Виконані експерименти показали, що для суспензії ОВВП на основі фільтр-кеку з добавками біорідин, основні екологічні показники в більшості випадків краще, ніж при спалюванні вугілля, але гірше, ніж у ВВП без добавок, і зіставні для ОВВП з відпрацьованим турбінним маслом.

РОЗДІЛ 4
ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на працівника лабораторії

Представлені дослідження в даній роботі засновані на використанні засобів обчислюваної техніки, тому вся необхідна апаратура знаходиться на автоматизованих робочих місцях (АРМ) лаборантів хімічної лабораторії. В процесі роботи з системою на працівників можуть впливати наступні шкідливі виробничі фактори:

- шум на робочому місці;
- електромагнітне випромінювання;
- відсутність або нестача природного світла;
- недостатня освітленість робочої зони;
- наявність напруги в електричному ланцюзі, замикання якої може пройти через тіло людини;
- психофізіологічні фактори – розумове перенапруження, напруження зору і уваги, емоційні та довготривалі статичні навантаження.

Штучне освітлення в приміщеннях здійснюється системою загального рівномірного освітлення. До загального освітлення додатково можуть бути встановлені світильники місцевого освітлення. Для виключення засвічування екранів моніторів прямими світловими потоками світильники загального освітлення встановлюють з боку від робочого місця, паралельно лінії зору оператора і стінці з вікнами. В якості джерел світла при штучному освітленні повинні використовуватись переважно люмінесцентні лампи,наприклад лампи ЛБ-80. В світильниках місцевого освітлення допускається використання ламп накалювання.

При виконанні основної роботи на комп’ютері рівень шуму на робочому місці не повинен перевищувати 50 дБА. Знизити рівень шуму в приміщеннях можна за рахунок використання звукопоглинаючих матеріалів з максимальним

коефіцієнтом звукопоглинання в області частот 63-8000Гц для обшивки приміщень.

АРМ по вибухонебезпечній і пожарній небезпеці відповідають категорії Б і мають ступінь вогнестійкості II. Для тушіння пожарів в приміщеннях АРМ використовуються вуглекислотні вогнегасники ОУ-2 та ОУ-5, перевагами яких є діелектричні властивості вуглекислоти і збереженість електронного обладнання.

Аналіз шкідливих і небезпечних факторів та карта умов праці для робочого місця працівника лабораторії представлена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Оцінка факторів виробничого та трудового процесу працівника лабораторії

№ п/п	Найменування чинників	Джерела їх виникнення	Характер дії
1	Наявність шуму, вібрацій	Принтер	Негативно позначається на органах слуху. Підвищує стомлюваність
2	Недостатня освітленість	Стан систем природного і штучного освітлення	Шкодить органам зору
3	Несприятливий мікроклімат	Стан систем опалювання і вентиляції	Страждають дихальні шляхи, шкірні покриви
4	Електромагнітне випромінювання, у тому числі рентгенівське випромінювання	Монітор ЕОМ, системний блок, електропроводка живлячої мережі ЕОМ	Шкодить всьому організму. Вірогідність онкозахворювань
5	Фізична втома	Перенапруження зорового аналізатора, статичність і незручність пози	Розвиток кістково-м'язових захворювань
6	Пожежонебезпечність приміщення	Наявність горючих матеріалів і джерел спалаху	Гіпотетична небезпека опіків
7	Статична електрика	Діелектрична поверхня екрану дисплея, ЕПТ	Можливий електричний удар

Роботи операторського типа виконуються сидячи і відносяться до категорії 1а - легка фізична робота.

4.2 Заходи з поліпшення умов праці

Мікроклімат – це метеорологічні умови навколишнього середовища, які визначаються діючими на людину сполученнями:

- температурою навколишнього середовища;
- показником відносної вологості;
- швидкістю руху повітря;
- інтенсивністю теплового випромінювання.

Тривала дія на людину несприятливих метеорологічних умов погіршує самопочуття, знижує продуктивність праці і часто призводить до різних захворювань. Метеорологічні умови вибираються відповідно до вимог ГОСТ 12.1.005 – 88, виходячи з категорії тяжкості робіт, періоду року.

Оптимальні норми температури, відносній вологості, швидкості руху повітря в приміщенні і категорія робіт в холодний і теплий період року наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Допустимі і оптимальні значення параметрів метеорологічних умов

Категорія робіт за тяжкістю	Період року	Температура, °С	Відносна вологість %	Швидкість руху повітря в приміщенні м/с
Допустимі значення параметрів				
1а	Холодний	19-25	75	не більше 0,1
1а	Теплий	21-27	55	0,1-0,2
Оптимальні значення параметрів				
1а	Холодний	22-24	40-60	0,1
1а	Теплий	23-25	40-60	0,1

В період роботи за дисплеєм здійснює інтенсивний вплив електромагнітне випромінювання, яке може стати причиною професійних захворювань. Комп'ютери потрапляють за визначенням в 5 - й діапазон (низькі частоти).

Основним джерелом електромагнітного випромінювання, у тому числі рентгенівського, в приміщенні є електронно - променеві трубки (ЕПТ) моніторів. Згідно ДНАОП 0.00 -1.31-99 потужність експозиційної дози рентгенівського випромінювання трубки в будь - якій точці перед екраном на відстані 5 см від його поверхні не повинна перевищувати 100 мкР/год.

Заходами захисту від випромінювання є :

- використання моніторів з вбудованими захисними екранами;
- регламентовані перерви при роботі з комп'ютером на 15 хвилин, через кожних 2 години безперервної роботи.

Засоби захисту від статичної електрики:

- вживання захисних екранів із заземленням;
- вживання спеціальних екранів (вбудованих) з провідним антистатичним покриттям (струмопровідні);
- підтримка відносної вологості в приміщенні на рівні (55 – 65)%;
- своєчасне провітрювання;
- використання антистатичних покриттів на підлогах (лінолеум), натуральний натільний одяг.

До заходів захисту від іонізуючого рентгенівського випромінювання відносяться:

- використання внутрішнього металевого корпусу монітора;
- обмеження часу безперервного знаходження перед монітором – не більше 4 годин;
- не розміщувати ВДТ концентровано в робочій зоні.

При роботі монітора утворюються змінні електромагнітні поля.

До заходів захисту від електромагнітних випромінювань відносяться:

- захист відстанню (відстань від передньої частини монітора має бути 1,5 м, від задньої частини 2 м);
- захист часом (не більше 4годин);
- може вбудовуватися захисний екран, на який замикається металевий корпус, що забезпечує низьку радіацію, тобто зниження характеристик електромагнітних полів до фонових значень вже на відстані 5-7 см від екрану;
- у моніторі встановлюються спеціальні елементи (компенсаційні котушки або екрануючі кільця із спеціального сплаву з високою магнітною проникністю, які розташовують довкола системи, що відхиляє, або елементів рядкової розгортки);

- необхідно також дотримувати правила організації робочого місця.

Відповідно до ГОСТ 12.1.003-83 і ДНАОП 0.03-3.14-85 в приміщеннях обчислювальних центрів рівні звуку та еквівалентні рівні звуку не повинні перевищувати 50 дБА. Захистом від шуму в приміщенні можуть служити кришки на принтері, зменшити шум можна також відстанню, за допомогою установки перебірки, ізоляцією принтерів в інші приміщення.

Правильно спроектоване і виконане виробниче освітлення покращує умови зорової роботи, знижує стомлюваність, сприяє підвищенню продуктивності праці, благотворно впливає на виробниче середовище, надаючи позитивну психологічну дію на працюючого, підвищує безпеку праці та знижує травматизм. Недостатність освітлення призводить до напруги зору, ослабляє увагу, призводить до настання передчасної стомленості. Надмірно яскраве освітлення викликає засліплення, роздратування і різь в очах, неправильний напрям світла на робочому місці може створювати різкі тіні, відблиски,дезорієнтувати працюючого. Всі ці причини можуть призвести до нещасного випадку на виробництві або профзахворювань.

При виконанні робіт категорії високої зорової точності (найменший розмір об’єкту розрізнення 0,3 – 0,5 мм) величина коефіцієнта природного освітлення повинна бути не нижчою 1,5 %, а при зоровій роботі категорії середньої точності (найменший розмір об’єкту розрізнення 0,5 – 1 мм) величина коефіцієнта природного освітлення повинна бути не нижчою 1 %. У якості джерела штучного освітлення звичайно використовуються люмінесцентні лампи, які попарно об’єднуються в світильники, та які повинні розташовуватися рівномірно над робочими поверхнями.

Вимоги до освітленості в приміщеннях, де встановлені персональні комп’ютери, наступні: при виконанні зорових робіт категорії високої точності загальна освітленість повинна складати 300 лк, а комбінована освітленість повинна складати 750 лк. При виконанні зорових робіт категорії середньої точності загальна освітленість повинна складати 200 лк, а комбінована освітленість повинна складати 300 лк.

4.3 Електробезпека

Електробезпека - система організаційних і технічних заходів і засобів, що забезпечують захист людей від шкідливої і небезпечної дії електричного струму, електричної дуги, електричного поля і статичної електрики.

При проектуванні систем електропостачання, монтажі силового електроустаткування і електричного освітлення в будівлях і приміщеннях для ЕОМ необхідно дотримуватися вимог нормативно - технічній документація. Комплекс необхідних заходів з техніки безпеки визначається, виходячи з видів електроустановки, її номінальної напруги, умов середи, типа приміщення і доступності електроустаткування.

Для забезпечення електробезпеки в електромережах лабораторії необхідно застосовувати їх електричне розділення. Електричний щит керування оснащують кнопкою аварійного вимикання. Обладнання вмикають послідовно від спільного вимикача до вимикачів кіл, що розгалужуються; останні в цьому випадку повинні бути вимкнені. Вимикають обладнання у зворотному порядку. Не дозволяється використовувати нестандартні запобіжники. Якщо помічено несправності в електромережі лабораторії, у тому числі і у випадку виходу з ладу електроламп, необхідно повідомити електрика.

ЕОМ є однофазним споживачем електроенергії, що живиться від змінного струму 220 В від мережі із заземленою нейтраллю. АПК «Майстер» відноситься до електроустановок до 1000 В закритого виконання, всі струмопровідні частини знаходяться в кожухах. За способом захисту людини від ураження електричним струмом, ЕОМ і периферійна техніка повинні відповідати 1 класу захисту.

Передбачені такі заходи електробезпеки: конструктивні, схемно-конструктивні, експлуатаційні.

Конструктивні заходи забезпечують захист від випадкового дотику до струмопровідних частин за допомогою захисних оболонок і ізоляції струмоведучих частин. Ступінь захисту оболонки повинен відповідати класу пожежонебезпечної зони приміщення П-IIа

Схемно-конструктивні заходи призначені для забезпечення захисту від ураження електричним струмом при дотику до металевих оболонок, які можуть опинитися під напругою в результаті аварії. У даному приміщенні в комп'ютерах застосовується занулення. Біля монітора передбачена подвійна
ізоляція.

Експлуатаційні заходи. Необхідно дотримувати правила техніки безпеки при роботі з високою напругою і наступних запобіжних засобів:

- монтаж, обслуговування, ремонт і наладка ЕОМ, заміна деталей, пристосувань, блоків повинна здійснюватися тільки при повному відключенні живлення;
- заземлені конструкції приміщення мають бути надійно захищені діелектричними щитками або сітками від випадкового дотику.

Виходячи з санітарних норм роботи лабораторій обчислювальної техніки її площа повинна бути визначена з умови 4,5-5 м^2 на одного лаборанта. В кабінеті повинна підтримуватись оптимальна температура 17-21°С, вологість 40-60 %.

4.4 Протипожежна безпека

Пожежна безпека об'єкта повинна забезпечуватися системами запобігання пожежі та протипожежного захисту, у тому числі організаційно - технічними заходами.

Згідно з вимогою ГОСТ 12.1.004 -91 пожежна безпека забезпечується наступними заходами:

- системою запобігання пожежам;
- системою пожежного захисту;
- організаційними заходами щодо пожежної безпеки.

Запобігання пожежі досягається наступними заходами:

- запобігання утворенню горючого середовища;
- запобігання наявності в горючій середі джерел запалення.

Для зменшення небезпеки займання в горючому середовищі передбачено:

1) використання устаткування, відповідного класу пожежонебезпечної зони П –IIа: ступінь захисту електроапаратури має бути не менше IP-44, ступінь захисту світильників IP -23;

2) блискавко захист будівель, споруд і устаткування; для даного класу виробничих будівель класу пожежонебезпечної зони П-IIа і місцевості з середньою грозовою діяльністю 20, тобто для умов м. Запоріжжя встановлено III категорію блискавкозахисту;

3) забезпечення захисту від короткого замикання (контроль ізоляції,використання запобіжників);

4) вживання заземлення захисного екрану для стоку статичної електрики.

У системі пожежного захисту передбачено аварійне відключення апаратів і комунікацій. Як сповіщення використовуються термоелектричні датчики диференціальної дії. При вибиранні засобу гасіння пожежі для забезпечення безпеки людини від можливості ураження електричним струмом в приміщенні передбачено використовувати вуглекислотний вогнегасник типа ОУ-5. У приміщенні знаходиться чотири вогнегасники оскільки, загальна площа приміщення-36м^2,а на кожних 20м^{2}призначається мінімум два вогнегасника. Вогнегасники знаходиться на видному і досяжному місці. При виникненні пожежі передбачена можливість повідомлення в пожежну охорону по телефону. Ступінь вогнестійкості будівлі – II.

4.5 Засоби індивідуального захисту

До заходів щодо зменшення впливу на працівників ЕОМ належать: організаційні, інженерно-технічні та лікарсько-профілактичні. Організаційні заходи здійснюють органи санітарного нагляду. Вони проводять санітарний нагляд за об'єктами, в яких використовуються джерела електромагнітних випромінювань.

Інженерно-технічні заходи передбачають таке розташування джерел ЕМП, яке б зводило до мінімуму їх вплив на працюючих, використання в умовах

виробництва дистанційного керування апаратурою, що є джерелом випромінювання, екранування джерел випромінювання, застосування засобів індивідуального захисту (халатів, комбінезонів із металізованої тканини, з виводом на заземлюючий пристрій). Для захисту очей доцільно використовувати захисні окуляри ЗП5-90. Скло окулярів вкрито напівпровідниковим оловом, що послаблює інтенсивність електромагнітної енергії при світлопропусканні не нижче 75%.

Взагалі, засоби індивідуального захисту необхідно використовувати лише тоді, коли інші захисні засоби неможливі чи недостатньо ефективні: при проходженні через зони опромінення підвищеної інтенсивності, при ремонтних і налагоджувальних роботах в аварійних ситуаціях, під час короткочасного контролю та при зміні інтенсивності опромінення. Такі засоби незручні в експлуатації, обмежують можливість виконання трудових операцій, погіршують гігієнічні умови.

У радіочастотному діапазоні засоби індивідуального захисту працюють за принципом екранування людини з використанням відбиття і поглинання ЕМП. Для захисту тіла використовується одяг з металізованих тканин і радіопоглинаючих матеріалів. Металізовану тканину роблять із бавовняних ниток з розміщеним всередині них тонким проводом, або з бавовняних чи капронових ниток, спірально обвитих металевим дротом. Така тканина, наче металева сітка, при відстані між нитками до 0,5 мм значно послаблює дію випромінювання. При зшиванні деталей захисного одягу треба забезпечити контакт ізольованих проводів. Тому електрогерметизацію швів здійснюють електропровідними масами чи клеями, які забезпечують гальванічний контакт або збільшують ємнісний зв'язок не контактуючих проводів.

Лікарсько-профілактичні заходи передбачають проведення систематичних медичних оглядів працівників, які перебувають у зоні дії ЕМП, обмеження в часі перебування людей в зоні підвищеної інтенсивності електромагнітних випромінювань, видачу працюючим безкоштовного лікарсько-профілактичного харчування, перерви санітарно-оздоровчого характеру.

4.6 Розрахунок захисного заземлення

Для забезпечення захисту від ураження електричним струмом при дотику до металевих не струмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою в результаті пошкодження ізоляції, в лабораторії пропонується застосувати захисне заземлення.

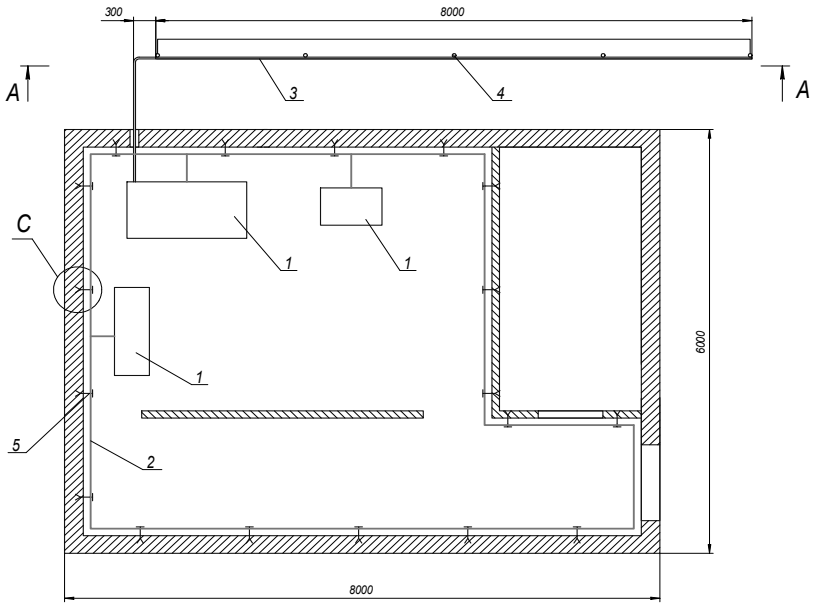
Зробимо розрахунок захисного заземлення для лабораторії (рис. 4.1).

Вибираємо виносний заземлювальний пристрій, який застосовується при малих струмах замикання на землю, зокрема в установках до 1000 В.

Заземлювач передбачається виконати з вертикальних труб l = 2 м із зовнішнім діаметром d = 0,03 м, верхні кінці яких з'єднуються між собою за допомогою горизонтального електрода – сталевої смуги перетином 4×40 мм, покладеної в землю на глибині t = 0,7 м. Питомий електричний опір ґрунту ρ = 100 Ом·м. Коефіцієнт сезонності для вертикального заземлювача дорівнює $\psi = 1{,}3$. Нормативний опір заземлювача – 4 Ом.

Визначимо розрахунковий питомий опір ґрунту для вертикального заземлювача:

$$\rho_в = \psi_в \cdot \rho = 1{,}3 \cdot 100 = 130 \text{ Ом·м.} \qquad (4.1)$$



1 – електроустановка; 2 – внутрішній контур заземлення; 3 – сполучна смуга; 4 – заземлювач; 5 – скоба кріплення.

Рисунок 4.1 - Схема виносного заземлення.

Опір розтіканню струму одиночного вертикального заземлювача, заглибленого в землю на 0,7 м:

$$R_0 = \left(\frac{\rho_в}{2\pi l}\right)\left[\ln\frac{2\cdot l}{d} + 0{,}5\ln\frac{4\cdot t + 3\cdot l}{4\cdot t + l}\right] = \left(\frac{130}{2\cdot 3{,}14\cdot 2}\right)\cdot\left[\ln\frac{2\cdot 2}{0{,}03} + 0{,}5\ln\frac{4\cdot 0{,}7 + 3\cdot 2}{4\cdot 0{,}7 + 2}\right] = 15{,}18 \text{ Ом.} \quad (4.2)$$

Орієнтовна кількість вертикальних заземлювачів складе:

$$n = \frac{1{,}3\cdot R_0}{R_н} = \frac{1{,}3\cdot 15{,}18}{4} = 5 \text{ шт.} \quad (4.3)$$

Знаходимо відношення відстані між заземлювачами до їх довжини:

$$A = \frac{a}{l} = \frac{2}{2} = 1. \quad (4.4)$$

Коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів $\eta_в = 0{,}7$, горизонтальних заземлювачів – $\eta_г = 0{,}74$.

Опір розтіканню струму групи вертикальних заземлювачів:

$$R_в = \frac{R_0}{n\cdot\eta_в} = \frac{15{,}18}{5\cdot 0{,}7} = 4{,}3 \text{ Ом.} \quad (4.5)$$

Довжина горизонтальної сполучної смуги:

$$l_г = a\cdot(n-1) = 2\cdot(5-1) = 8 \text{ м.} \quad (4.6)$$

Коефіцієнт сезонності для горизонтального заземлювача при довжині смуги 8 м – $\psi_г = 2{,}5$.

Розрахунковий питомий опір ґрунту для горизонтального заземлювача:

$$\rho_г = \psi_г \cdot \rho = 2{,}5 \cdot 100 = 250 \text{ Ом·м.} \quad (4.7)$$

Опір горизонтальної смуги, поглибленої в землю на 0,7 м становить:

$$R_г = \left(\frac{\rho_г}{2\pi \cdot l_г \cdot \eta_г}\right) \ln\left(\frac{2l_г^2}{bt}\right) = \left(\frac{250}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 8 \cdot 0{,}74}\right) \ln\left(\frac{2 \cdot 8^2}{0{,}04 \cdot 0{,}7}\right) = 56{,}65 \text{ Ом.} \quad (4.8)$$

Опір заземлювачів в цілому:

$$R_з = \frac{R_в \cdot R_г}{R_в + R_г} = \frac{4{,}3 \cdot 56{,}65}{4{,}3 + 56{,}65} = 4 \text{ Ом.} \quad (4.9)$$

Отриманий опір заземлювачів дорівнює номінальному (4 Ом), що відповідає вимогам ПБЕ.

Розташовуємо 5 заземлювачів в ряд на відстані 2 м один від одного.

4.7 Висновки

1. Аналіз шкідливих і небезпечних факторів дозволяє зробити висновок, що умови праці в приміщенні лабораторії характеризуються наявністю нешкідливих виробничих чинників, які не призводять до зростання захворюваності з втратою працездатності та проявом початкових ознак професійної патології.

2. Зниження рівня шуму, проникаючого в приміщення ззовні, може бути досягнуто збільшенням звукоізоляції захищаючих конструкцій, ущільненням по периметру притворів вікон, дверей. Еквівалентний рівень звуку не повинен перевищувати 60 дБА.

3. Будівлю, в якій знаходиться лабораторія, по вибуховій і пожежній небезпеці можна віднести до приміщення категорії Д, оскільки в лабораторії є

г

орючі (книги, документи, меблі) і важкоспалимі речі (різне лабораторне устаткування), які при взаємодії з вогнем можуть горіти без вибуху.

4. Для забезпечення захисту від ураження електричним струмом при дотику до металевих не струмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою в результаті пошкодження ізоляції, в лабораторії пропонується застосувати захисне заземлення.

ВИСНОВКИ

1. Результати теоретичних досліджень, дозволяють оцінити можливості зниження утворення оксидів азоту за рахунок зміни технологічних параметрів процесу горіння.

2. Низький вихід NO_x можна досягти при спалюванні збіднених сумішей з високим коефіцієнтом надлишку повітря. При збільшенні коефіцієнта надлишку повітря суміші температура полум'я знижується і утворення оксидів азоту зменшується. Однак зменшується і швидкість перетворення CO в CO_2. Таким чином, існує верхня межа для величини коефіцієнта надлишку повітря, коли утворюється концентрація.

3. Визначено основні фактори, що мають значний вплив на процеси формування основних антропогенних викидів при спалюванні вугільного палива. До них відносяться температура газоповітряного середовища, сіро- і азотовмістні палива, кількість летких і вологість палива. Виділено типові відмінності в концентраціях SO_x та NO_x, що утворюються при горінні вугілля різного ступеня метаморфізму, а також продуктів їх переробки.

4. Присутність води (несучої фази суспензії) є визначальним фактором у суттєвому зниженні концентрацій оксидів сірки та азоту при спалюванні ВВП та ОВВП. Горіння водовмісних суспензій супроводжується характерними хімічними реакціями, у яких бере участь вода (у вигляді водяної пари), сприяючи зниженню вмісту оксидів азоту та сірки в димових газах.

5. Порівняння основних екологічних характеристик показало, що з точки зору концентрацій SO_x та NO_x немає істотної різниці між водовугільним паливом, приготованим з вугілля або відходів їх переробки. Обидва типи суспензій здатні суттєво підвищити екологічні характеристики спалювання палива на вугільних ТЕС.

6. Додавання рідкої паливної компоненти призводить до зростання концентрацій антропогенних викидів у середньому на 20–60 % порівняно з ТВВ. Але якщо проводити порівняння з вугіллям, то погіршення екологічних

x

арактеристик за рахунок додавання відпрацьованих олій чи мазуту не є масштабним (не більше 10–15%).

7. Виконані експерименти показали, що для суспензії ОВВП на основі фільтр-кеку з добавками біорідин, основні екологічні показники в більшості випадків краще, ніж при спалюванні вугілля, але гірше, ніж у ВВП без добавок, і зіставні для ОВВП з відпрацьованим турбінним маслом.

8. Аналіз шкідливих і небезпечних факторів дозволяє зробити висновок, що умови праці в приміщенні лабораторії характеризуються наявністю нешкідливих виробничих чинників, які не призводять до зростання захворюваності з втратою працездатності та проявом початкових ознак професійної патології.

9. Зниження рівня шуму, проникаючого в приміщення ззовні, може бути досягнуто збільшенням звукоізоляції захищаючих конструкцій, ущільненням по периметру притворів вікон, дверей. Еквівалентний рівень звуку не повинен перевищувати 60 дБА.

10. Для забезпечення захисту від ураження електричним струмом при дотику до металевих не струмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою в результаті пошкодження ізоляції, в лабораторії пропонується застосувати захисне заземлення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Круть О. А. Водовугільне паливо. К.: Наук. думка, 2002. 172 с.

2. Альтернативні палива та інші нетрадиційні джерела енергії : Монографія / [Адаменко О., Височанський В., Льотко В. та ін.]. ІваноФранківськ : ІМЕ, 2001. 432 с.

3. Літовкін В. В. Аналітичний огляд технологій и устаткування для виробництва водовугільного паливо в Україні. Нові Виклики часу : зб. наук. праць. Львів: НВФ «Українські Технології». 2009. С. 76-80.

4. Халатов А. А. Водовугільне паливо в енергетиці України. Сучасний стан и Проблеми розвитку. Вісник Академії митної служби України. Технічні науки. 2009. № 2 (42). С. 33-43.

5. Круть О., Білецький В. Водовугільне паливо: стан проблеми і перспективи використання. Вісник НАН України. 2013. № 8. С. 58–59.

6. Білецький В. С., Круть О. А., Власов Ю. Ф. Дослідження характеристик водовугільного палива залежно від властивостей вихідного вугілля. Наук. вісн. Національного гірничого університету. 2006. № 6. С. 46–49.

7. Круть О. А, Білецький В. С, Сергєєв П. В. Аналіз енергетичного стану твердої фази водовугільної суспензії з позиції ДЛФО. Збагачення корисних копалин. 2006. № 25. С. 14–20.

8. Деякі питання визначення середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності галузевого рівня на 2012–2016 роки Постанова КМ України 17.05.2012. № 397.

9. Оновлення Енергетичної стратегії України на період до 2030 р. Режим доступу: http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/ doccatalog/document?id=222032 (дата звернення: 04.09.2024).

10. Гайдай А. А. Оцінка якісних показників кам’яного вугілля при видобутку в технологічному ланцюзі та можливість вторинного використання продуктів збагачення. Науковий вісник НГУ, 2010, №1, С. 23-25.

11. Ковальський В. Про підвищення рівня еколого-енергетичної безпеки України.Економіка України. 2000. № 10. С. 34 – 41.

12. Ресурси матеріальні вторинні. Терміни та визначення : ДСТУ 2102-92. – [Чинний від 1993-07-01]. К.: Держстандарт України, 1996. 25 с. (Національний стандарт України).

13. Кармазиненко С. П., Кураєва І. В., Самчук А. І., Войтюк Ю. Ю., Манічев В. Й. Важкі метали у компонентах навколишнього середовища м. Маріуполь (еколого-геохімічні аспекти). Київ, 2014. 168 с.

14. Сліпенюк Т. С. Флокуляційні структурування водних суспензій в присутності полімерів Композиційні матеріали: Тези доповідей III Міжнародної науково-технічної конференції, 9–11 червня 2004 року: матер. конф. Київ, Україна, 2004. С. 127.

15. Кириленко І. Г. Формування ринку українського біопалива: передумови, перспективи, стратегія. Економіка АПК. 2010. № 4. С. 62.

16. Дубовський С. В. Енергоекономічний аналіз сполучених систем генерації електричної енергії і теплоти. Київ : Наукова думка. 2014. 182 с.

17. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Текст]: ДСН 3.36.042-99: Увед.1999-12-01. 9 с.

18. Державні будівельні норми. Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення: ДБН В.2.2 – 28: 2010: затв. Мінрегіонбуд України 30.12.10 : уведенні з 10.10.11.- К. : ПАТ Київ ЗНДІЕП. 2010. 28 с.: «Укрархбудінформ». УКНД 91.040.99

19. Державні будівельні норми. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва: ДБН В.1.1.7-2002: затв. Держбуд України 03.12.02 : уведенні з 01.05.03. К. : УкрНДІПБ. 2002. 44 с.

20. ДСТУ Б В.2.5-38:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд. Увед. 2009-01-01. К.: Мінрегіонбуд України. 2008. 65 с.

21. НАПБ А.01.001-2004. Правила пожежної безпеки в Україні. Увед. 2004-11-04. К.: М-во України з питань НС. 2004. 143 с.